员工岗位手册系列

JIAGONG ZHONGXIN CAOZUOGONG GANGWEI SHOUCE

加工中心操作工岗位手册

技术工人岗位必备
规范化您的岗位操作

北京京城机电控股有限责任公司工会 编
赵 莹◎主编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

员工岗位手册系列

加工中心操作工

岗位手册

北京京城机电控股有限责任公司工会 编

主 编 赵 莹
副主编 黄天石
参 编 周立生 高殿利 边雪梅 蔡双武 龚 军 郭庆兴
韩景丽 李 刚 李亚红 芦晓燕 彭 伟 束 京
赵振华 邢道远

机 械 工 业 出 版 社

本手册是数控加工中心操作工岗位员工必备的工具书，内容依据国家最新的职业技能标准编写。本书主要内容包括三部分：第一部分为岗位规范与操作规程。岗位规范是对操作者的主观要求；操作规程是操作者每天行动的准则。本部分内容是三个机床厂生产管理经验的总结。第二部分为操作者应当掌握的基础知识和专业技能。本部分内容是对加工中心操作者需要综合掌握的机、电、计算机及计算机辅助制造等多门学科知识，根据生产需要进行了深入浅出的讲解。第三部分为生产案例及典型问题解析。这部分都是作者在多年工作实践中发现的问题及解决办法，很多内容是其他同类书没有的。

本书不仅适合加工中心操作者查找资料和学习知识，更适合他们进一步了解、认识所操作的机床，将本书与每台机床附带的《机床操作手册》结合起来使用定会收到事半功倍的效果。本书对于企业生产管理者及职业院校的实训教师也有很好的借鉴意义，很多内容是专业技术人员实践经验的总结，从中提炼出的考题曾出现在多次数控技能大赛的试卷中。

图书在版编目（CIP）数据

加工中心操作工岗位手册/北京京城机电控股有限责任公司工会编；赵莹主编. —北京：机械工业出版社，2014.10

（员工岗位手册系列）

ISBN 978-7-111-47864-5

Ⅰ.①加… Ⅱ.①北…②赵… Ⅲ.①加工中心－操作－技术手册 Ⅳ.①TG659－62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 204911 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：何月秋　责任编辑：何月秋　陈建平

版式设计：霍永明　责任校对：张晓蓉

封面设计：马精明　责任印制：乔　宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 32.5 印张 · 720 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-47864-5

定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：（010）88361066

销售一部：（010）68326294

销售二部：（010）88379649

读者购书热线：（010）88379203

策划编辑电话：（010）88379879

网络服务

教材网：http://www.cmpedu.com

机工官网：http://www.cmpbook.com

机工官博：http://weibo.com/cmp1952

封面无防伪标均为盗版

《员工岗位手册系列》编委会名单

主　任　赵　莹

编　委（按姓氏笔画排序）

于　丽　马　军　方咏梅　王　诚　王兆华　王克俭
王连升　王京选　王博全　卢富良　石仲洋　刘　哲
刘运祥　刘海波　孙玉荣　权英姿　阮爱华　吴玉琪
吴伯新　吴振江　张　健　张　维　张文杰　张玉龙
张红秀　李　平　李　英　李洪川　李笑声　杜跃熙
周　强　周纪勇　林乐强　武建军　宣树青　胡德厚
赵晓军　夏增周　徐文秀　爱新觉罗·蕤琪　聂晓溪
袁新国　常胜武　韩　湧　廉　红　谭秀田　薛俊明

序

当前我国正面临千载难逢的战略机遇期，同时，国际金融危机、欧债危机等诸多不稳定因素也将对我国经济发展产生不利影响。在严峻考验面前，创新能力强、结构调整快、职工素质高的企业才能展示出勃勃生机。事实证明：在“做强二产”，实现高端制造的跨越发展中，除了自主创新，提高核心竞争力外，还必须拥有一支高素质的职工队伍，这是现代企业生存发展的必然要求。我国已进入“十二五”时期，转方式、调结构，在由“中国制造”向“中国创造”转变的关键期和提升期，重要环节就是培育一批具有核心竞争力和持续创新能力的创新型企业。造就数以千万的技术创新人才和高素质职工队伍，这是企业在经济增长中谋求地位的战略选择；是深入贯彻科学发展观，加快职工队伍知识化进程，保持工人阶级先进性的重大举措；也是实施科教兴国战略，建设人才战略强国的重要任务。

《2002 年中国工会维权蓝皮书》中有段话：“有一个组织叫工会，在任何主角们需要的时候和地方，他们永远是奋不顾身地跑龙套，起承转合，唱念做打……为职工而生，为维权而立。”北京京城机电控股有限责任公司工会从全面落实《北京“十二五”时期职工发展规划》入手，从关注企业和职工共同发展做起，组织编撰完成了涵盖 30 个职业的《员工岗位手册系列》，很好地诠释了这句话。此套丛书是工会组织发动企业工程技术人员、一线生产技师、职业教师和工会工作者共同参与编著而成的，注重了技术层面的维度和深度，体现了企业特色工艺，涵盖了较强的专业理论知识，具有作业指导书、学习参考书以及专业工具书的特性，是一套独特的技能人才必备的“百科全书”。全书力求实现企业工会让广大职工体验“一书在手，工作无忧”以及好书助推成长的深层次服务。

我们希望，机电行业的每名职工都能够通过《员工岗位手册系列》的帮助，学习新知识，掌握新技术，成为本岗位的行家能手，为“十二五”发展战略目标彰显工人阶级的英雄风采！

中共北京市委常委，市人大常委会副主任、
党组副书记，市总工会主席

梁伟

前　言

当前，随着我国从装备制造业大国向强国迈进，科技进步、产业结构调整以及市场经济的竞争，促进了数控机床使用量的剧增。加工中心作为机械制造系统中一种重要的具有高效率、高精度与高柔性特点的自动化加工设备，可有效解决复杂、精密、小批多变零件的加工问题，充分适应了现代化生产的需要。加工中心的不断发展与普及，急需大量高素质的从事编制数控加工程序并操作加工中心机床进行零件多工序组合切削加工的人员。

对于一名加工中心操作者来说，操作好机床不是简单地装卸工件、按按钮，从近几年在技能大赛中涌现出来的佼佼者来看，无不是既有熟练的操作技能，又具有良好的基础知识。一名优秀的加工中心操作者需要掌握机、电、自动控制、计算机及计算机辅助制造、机械加工工艺、数控刀具、材料、液压与气动、润滑与冷却等诸多学科知识。本手册根据生产实际需要进行了编写，其中较复杂的一些内容都配有示例。此外，本手册详细描述了加工中心的结构与用途、元器件的作用与工作原理、使用保养注意事项等，重点介绍这些部件对于机床安全、可靠地运行，对于保障加工精度、提高加工效率的作用，以使读者加深对加工中心性能的理解。

本手册搜集整理了大量的珍贵资料，其中许多是编者们多年工作经验的总结，可以满足加工中心操作人员提高素质、开阔视野、提高技能水平的需求。

本手册不仅适合加工中心操作者查找资料和学习知识，更适合他们进一步了解、认识机床。因此，将本手册与机床附带的《机床操作手册》结合起来使用，定会收到事半功倍的效果。

本手册对于一些基层生产管理者及职业院校的实训教师也具有很高的参考价值，由于很多内容是专业技术人员实践经验的总结，因此具有很强的实践指导意义，从中提炼出的考题曾出现在多次数控技能大赛的试卷中。

本手册由赵莹任主编，黄天石任副主编。周立生、高殿利参与了编写及组织工作，参加本手册编写的还有龚军、芦晓燕、李亚红、蔡双武、李刚、束京、彭伟、边雪梅、韩景丽、郭庆兴、赵振华、邢道远等。

需特别说明的是谢秋荣为本手册做了大量的审稿工作，杨家骥以其丰富的实践经验为本书提供了很多素材，本手册在编写过程中还得到了北京京城机电控股有限责任公司及其下属众多企业的大力支持，在此一并表示感谢。

本手册编写时虽然力求严谨、完善，但由于时间仓促，同时编写人员水平有限，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编　者

目　录

序

前言

第一篇　职业道德及岗位规范

第一章　职业道德 …… 1

第二章　岗位规范与规程 …… 4

第一节　加工中心操作工岗位规范 …… 4

第二节　加工中心操作规程 …… 5

第三节　加工中心保养规程 …… 7

第二篇　岗位基础知识

第一章　加工中心概述 …… 12

第一节　加工中心的分类和组成 …… 12

第二节　加工中心的工作原理 …… 17

第三节　螺距补偿 …… 17

第四节　选购立式加工中心的几项指标 …… 19

第二章　机械结构 …… 24

第一节　关键零部件的结构特点 …… 24

第二节　影响系统刚性的因素 …… 39

第三章　数控系统 …… 41

第一节　数控系统的作用 …… 41

第二节　开环、半闭环与闭环控制系统 …… 48

第三节　参数的种类和作用 …… 51

第四节　几种主流数控系统 …… 69

第五节　数据传输 …… 74

第四章　伺服系统 …… 82

第一节　伺服系统的组成 …… 82

第二节　伺服系统的作用 …… 87

第三节　数控伺服系统与加工精度和速度 …… 88

第五章　工艺知识 …… 92

第一节　基本概念 …… 92

第二节　定位、找正与夹紧 …… 95

第三节　工艺系统受力及内应力对加工的影响 …… 103

第四节　工艺系统的热变形 … 106

第五节　工艺尺寸链 …… 109

第六节　加工精度 …… 113

第七节　机械加工表面质量 … 116

第六章　刀具知识 …… 119

第一节　刀具的切削原理 …… 119

第二节　刀柄接口的种类及特点 …… 129

第三节　常用刀具材料及切削参数 …… 137

第四节　刀具种类及使用

特点 …… 151
第七章　读图知识 …… 170
第一节　机械制图的基本知识 …… 170
第二节　尺寸公差与配合简介 …… 191
第三节　几何公差及表面结构的粗糙度简介 …… 198
第四节　读图方法 …… 227
第八章　数学与力学知识 …… 233
第一节　函数 …… 233
第二节　三角函数 …… 238
第三节　平面解析几何 …… 242
第四节　平面向量 …… 250
第五节　力的合成与分解 …… 251
第九章　手工编程 …… 257
第一节　建立工件坐标系 …… 257
第二节　建立工件坐标系的方法 …… 258
第三节　程序格式 …… 260
第四节　增量编程与绝对值编程 …… 289
第五节　重复图形的几种编辑方法 …… 293
第十章　计算机辅助加工 …… 297
第一节　计算机辅助造型 …… 297
第二节　计算机辅助编程 …… 308
第三节　后处理 …… 328
第四节　程序的输入及输出 … 344
第十一章　加工中心操作方法 …… 351
第一节　通用操作方法 …… 351
第二节　卧式加工中心操作方法补充 …… 365
第三节　数控机床操作过程中需要重点维护保养的内容 …… 366
第十二章　加工中心的精度检验 … 368
第一节　几何精度的检测 …… 368
第二节　定位精度的检验 …… 369
第三节　切削精度的检验 …… 370

第三篇　生产中的典型问题解析

第一章　工艺类问题 …… 372
第二章　机械方面的问题 …… 374
第三章　建立工件坐标系方面的问题 …… 377
第四章　刀具准备与使用方面的问题 …… 381
第五章　编程类问题 …… 386
第六章　操作类问题 …… 400
第七章　维修类问题 …… 404
第八章　液压与气动类问题 …… 415
第九章　润滑剂与切削液类问题 … 417

第四篇　加工中心加工实例

案例 1　箱体类零件加工实例 …… 419
案例 2　圆柱面插补加工宏程序编程实例 …… 428
案例 3　螺纹铣削加工 …… 433
案例 4　工件在工作台上的摆放问题 …… 438
附录 …… 440
附录 A　加工中心操作工国家职业标准 …… 440
附录 B　机床行业职业技能要求补充 …… 453
附录 C　FANUC 0i-MC 系统

代码表…… 455
附录 D SIEMENS 828D 系统
代码表 …… 457
附录 E 大隈系统代码表…… 460
附录 F 表面粗糙度…… 469
附录 G 标准公差与偏差 …… 474
附录 H 螺纹标准 …… 487
附录 I 职称论文写作注意
事项 …… 510
参考文献 …… 512

第一篇 职业道德及岗位规范

第一章 职业道德

一、职业道德的基本概念

职业道德是规范约束从业人员职业活动的行为准则。加强职业道德建设是推动社会主义物质文明和精神文明建设的需要，是促进行业、企业生存和发展的需要，也是提高从业人员素质的需要。掌握职业道德基本知识，树立职业道德观念是对每一个从业人员最基本的要求。

1. 道德与职业道德

道德，就是一定社会、一定阶级向人们提出的处理人和人之间、个人与社会之间、个人与自然之间各种关系的一种特殊的行为规范。道德是做人的根本。道德是一个庞大的体系，而职业道德是这个体系中的一个重要部分，它是社会分工发展到一定阶段的产物。所谓职业道德，是指从事一定职业的人们，在特定的工作和劳动中以其内心信念和特殊社会手段来维持的，以善恶进行评价的心理意识、行为原则和行为规范的总和，它是人们在从事职业的过程中形成的一种内在的、非强制性的约束机制。职业道德的内容包括职业道德意识、职业道德行为规范和职业守则等。职业道德是社会道德在职业行为和职业关系中的具体体现，是整个社会道德生活的重要组成部分。

2. 职业道德的特征

职业道德的特征有以下三个方面：

1）范围上的局限性。任何职业道德的适用范围都不是普遍的，而是特定的、有限的。一方面，它主要适用于走上社会岗位的成年人；另一方面，尽管职业道德也有一些共同性的要求，但某一特定行业的职业道德也只适用于专门从事本职业的人。

2）内容上的稳定性和连续性。由于职业分工有其相对的稳定性，与其相适应的职业道德也就有较强的稳定性和连续性。

3）形式上的多样性。职业道德因行业而异，一般来说，有多少种不同的行业，就有多少种不同的职业道德。

二、职业道德的社会作用

1. 职业道德与企业的发展

（1）职业道德是企业文化的重要组成部分　职工是企业的主体，企业文化必须以企业职工为中介，借助职工的生产、经营和服务行为来实现。

（2）职业道德是增强企业凝聚力的手段　职业道德是协调职工同事之间、职工与领导之间以及职工与企业之间关系的法宝。

（3）职业道德可以提高企业的竞争力　职业道德有利于企业提高产品和服务的质量；有利于降低产品成本、提高劳动生产率和经济效益；有利于企业的技术进步；有利于企业摆脱困难，实现企业阶段性的发展目标；有利于企业树立良好形象、创造著名品牌。

2. 职业道德与人自身的发展

（1）职业道德是事业成功的保证　没有职业道德的人干不好任何工作，每一个成功的人往往都有较高的职业道德。

（2）职业道德是人格的一面镜子　人的职业道德品质反映着人的整体道德素质，职业道德的提高有利于人的思想道德素质的全面提高，提高职业道德水平是人格升华最重要的途径。

三、社会主义职业道德

职业道德是社会主义道德体系的重要组成部分。由于每个职业都与国家、人民的利益密切相关，每个工作岗位、每一次职业行为，都包含着如何处理个人与集体、个人与国家利益的关系问题。因此，职业道德是社会主义道德体系的重要组成部分。

职业道德的实质内容是树立全新的社会主义劳动态度。职业道德的实质就是在社会主义市场经济条件下，约束从业人员的行为，鼓励其通过诚实的劳动，在改善自己生活的同时，增加社会财富，促进国家建设。劳动无疑是个人谋生的手段，也是为社会服务的途径。劳动的双重含义决定了从业人员要有全新的劳动态度和职业道德观念。社会主义职业道德的基本规范如下。

1. 爱岗敬业，忠于职守

任何一种道德都是从一定的社会责任出发，在个人履行对社会责任的过程中，培养相应的社会责任感，从长期的良好行为和规范中建立起个人的道德。因此，职业道德首先要从爱岗敬业、忠于职守的职业行为规范开始。

爱岗敬业是对从业人员工作态度的首要要求。爱岗就是热爱自己的工作岗位，热爱本职工作。敬业就是以一种严肃认真的态度对待工作，工作勤奋努力，精益求精，尽心尽力，尽职尽责。

爱岗与敬业是紧密相连的，不爱岗很难做到敬业，不敬业更谈不上爱岗。如果工作不认真，能混就混，爱岗就会成为一句空话。只有工作责任心强，不辞辛苦，不怕麻烦，精益求精，才是真正的爱岗敬业。

忠于职守，就是要求把自己职业范围内的工作做好，达到工作质量标准和规范要

求。如果从业人员都能够做到爱岗敬业、忠于职守，就会有力地促进企业与社会的进步和发展。

2. 诚实守信，办事公道

诚实守信、办事公道是做人的基本道德品质，也是职业道德的基本要求。诚实就是人在社会交往中不讲假话，能够忠于事物的本来面目，不歪曲、篡改事实，不隐瞒自己的观点，不掩饰自己的情感，光明磊落，表里如一。守信就是信守诺言，讲信誉、重信用，忠实履行自己应承担的义务。办事公道是指在利益关系中，正确处理好国家、企业、个人及他人的利益关系，不徇私情，不谋私利。在工作中要处理好企业和个人的利益关系，做到个人服从集体，保证个人利益和集体利益相统一。

信誉是企业在市场经济中赖以生存的重要依据，而良好的产品质量和服务是建立企业信誉的基础。企业的从业人员必须在职业活动中以诚实守信、办事公道的职业态度，为社会创造和提供质量过硬的产品和服务。

3. 遵纪守法，廉洁奉公

任何社会的发展都需要有力的法律、规章制度来维护社会各项活动的正常运行。法律、法规、政策和各种组织制定的规章制度，都是按照事物发展规律制定出来的，用于约束人们的行为规范。从业人员除了要遵守国家的法律、法规和政策外，还要自觉遵守与职业活动行为有关的制度和纪律，如劳动纪律、安全操作规程、操作程序、工艺文件等，才能很好地履行岗位职责，完成本职工作任务。

廉洁奉公强调的是，要求从业人员公私分明，不损害国家和集体的利益，不利用岗位职权牟取私利。遵纪守法、廉洁奉公，是每个从业人员都应该具备的道德品质。

4. 服务群众，奉献社会

服务群众就是为人民服务。一个从业人员既是别人服务的对象，又是为别人服务的主体。每个人都承担着为他人做出职业服务的职责，要做到服务群众就要做到心中有群众、尊重群众、真心对待群众，做什么事都要想到方便群众。

奉献社会是职业道德中的最高境界，同时也是做人的最高境界。奉献社会就是不计个人的名利得失，一心为社会做贡献；它是指一种融在一件件具体事情中的高尚人格，就是为社会服务，为他人服务，全心全意为人民服务。从业人员达到了一心为社会做奉献的境界，就与为人民服务的宗旨相吻合了，就必定能做好自己的本职工作。

四、职业守则

1）遵守国家法律、法规和有关规定。

2）具有高度的责任心，爱岗敬业、团结合作。

3）严格执行相关标准、工作程序与规范、工艺文件和安全操作规程。

4）学习新知识新技能，勇于开拓和创新。

5）爱护设备、系统及工具、夹具、量具。

6）着装整洁，符合规定；保持工作环境清洁有序，文明生产。

第二章
岗位规范与规程

第一节　加工中心操作工岗位规范

一、爱岗敬业

从事任何行业都要讲究职业道德。其中爱岗敬业是最起码的要求。加工中心操作者要认真遵守岗位规范；严格执行《加工中心操作规程》等相关规定，不断提高自己的职业道德水平。

加工中心操作工必须经过培训，通过理论考试、实操考核并取得相应等级证书之后才能独立开展工作。

二、承担责任

加工中心在任何企业都属于贵重设备，加工中心操作工要明白自己肩上的责任，要珍惜自己的名誉，不断地追求更高的效率与更好的质量。

三、爱护设备

严格按照设备使用说明书进行操作和保养才能保持设备精度、延长设备使用寿命，决不能一时偷懒违反操作规程。在为企业谋得效益最大化的同时为自己创造更好的收益。

四、诚实守信

诚实守信是做人的基本原则，对于数控机床操作者来说更有特殊的意义。一旦发生事故后，必须按照操作规程的要求保持现场，实事求是地告知相关人员事故过程，只有这样才能减少损失。

五、不断学习

一名加工中心操作工除了操作与编程外，还要根据自身具体条件不断学习。在计算

机技术快速发展的今天，操作者务必在计算机辅助加工方面多下工夫，除了可以提高工作效率、减少失误、保障加工质量外，更应该有与时俱进的精神，才能保证不被淘汰。

更换新设备时，要认真学习新设备的《操作手册》《编程说明书》等资料，决不可凭经验、想当然行事。

六、文明生产

安全生产是对操作者的人身保护，而文明生产是培养操作者自尊、自重、自强的客观条件。只有在干净整洁、有秩序的环境里，才能充分调动操作者的积极性，才能最大限度发挥出设备的潜能。

七、保护环境

操作者要有节约意识，在提高效率、减少废品的同时还要注意节约材料（包括原材料和消耗品）、节水、节电、节油；减少主轴空转时间、机床空行程；减少辅助时间；合理选用切削参数，在刀具磨损与生产效率之间找到一个平衡点。

操作者还要有环保意识，尤其注意废切削液必须经过处理，不能直接排放。为保护生存环境尽自己的义务。

第二节　加工中心操作规程

为了保证加工中心的正常使用和人身安全，加工中心操作工必须遵守此操作规程。

1）在操作机床前，要认真阅读机床使用说明书，熟悉机床各部件组成、功能，尤其是“急停开关”的数量与位置；掌握该机床的操作方法及安全注意事项。

2）操作机床时必须穿合体工作服，禁止穿凉鞋。除装卸工件、清理切屑、去除毛刺、拆装刀具外，禁止戴手套操作机床及靠近任何旋转部件。

3）认真查看交接班记录，每天上班前注意检查机床外观。

4）起动机床前要按照机床润滑图表进行相应润滑，操作自动润滑的机床需要检查机床润滑油液面高度、放净油水分离器内的液体。

5）检查切削液液面高度、清除切削液箱内的切屑。

6）检查压缩空气压力及气体质量，打开压缩空气阀门。

7）依次合上电源柜闸箱手柄、打开机床侧总电源。

8）按照“先弱电、后强电”的原则：首先打开机床操作面板电源，然后松开急停按钮，观察机床状态是否正常。

9）对于使用相对编码器的机床需要操作各轴返回机床原点，其顺序首先是 Z 轴，之后 X、Y 轴可同时返回；工作台上没有干涉物时也可以三轴同时返回。

10）必要时应进行 1 号刀袋位置确认的操作。

11）预热机床。

12）检查刀库内的刀具与刀具表内的参数是否相符。

13）检查毛坯、夹具与图样、工艺是否相符。

14）检查坐标系原点位置。

15）检查程序，包括坐标系选择、程序格式、指令代码、加工参数、程序数值等相关数据的准确性。若需要在“机床锁住”条件下进行图形检查，务必确定该机床在检查之后是否需要重新返回参考点。

16）首件加工与新程序加工都要进行试切。零件试切时，要严格按照试切要领操作。

17）加工中不得从事任何与操作无关的事情，时刻注意（听、闻、看）机床运转情况。如果发现机床异常，应马上停止加工，查明原因后方可继续运行。

18）如遇紧急情况，立即按下“急停”按钮，马上通知上级领导及相关人员进行处理。除非抢救人员需要，不得移动机床。

19）自动换刀过程中，如遇换刀动作中途停止，在不明原因的情况下，不得轻易进入机床主轴运动区域，立刻请专业维修人员进行故障排除。

20）刀具在切削状态下，可通过调整主轴转速倍率和进给倍率获得最佳切削效果，记录实际切削参数，待试切完成后再对程序作相应的修改。

21）经过试切、调整、零件检验，确保程序运行无误且检验员检查首件产品合格后，方可进行零件的批量加工。在生产过程中根据零件生产批量确定检查密度进行自检；末件自检后还需经检验员确认合格才能开始新零件的加工。

22）有交换工作台的机床，为保证工作台（托盘）的重复定位精度及工作台（托盘）交换的安全、可靠，应当及时清理导轨及托盘上的切屑。

23）运转的托盘或加工状态下的托盘（工作台）上禁止摆放工具、量具或其他未经固定的物品。

24）为了保障操作者安全、防止切屑和切削液的飞散，机床工作时应关上机床防护门。

25）机床自动运转时，不要进入机床移动部件的动作范围内；禁止身体靠近或接触旋转中的主轴、工件及其他运动部位。

26）及时清理切屑。

27）在对机床进行清扫、检查及工装调整等作业时，必须切断电源，然后才能进入防护门内。不得踩踏防护罩。

28）大型加工中心在由两个操作工进行操作时，操作工之间要保持沟通，在互相确认后再进行操作，且上下工作台时要采取防滑措施。

29）龙门系列铣镗加工中心，在更换附件头时，镗头定位键槽应与附件头定位块对准后，再按顺序输入相关指令，以保证交换过程安全可靠。

30）未经设备管理者许可不得更改控制系统的原始参数。

31）机床无人运转时，要严加防范火灾的发生，必须使用不可燃的切削液，不要在机床周边放置易燃物品。

32）爱惜使用说明书、手册、参数表、专用工具等，要有专人妥善保管。

33）工作结束后，清理工件并去毛刺；及时清除切屑，擦拭设备；擦拭工具、量

具、刀具。

34）按照“先强后弱”的原则，依次按下“急停按钮”、关掉机床操作面板电源；最后关掉机床总电源开关、拉下电源柜闸箱手柄。

35）每日认真填写交接班（工作）记录。

第三节　加工中心保养规程

一、设备保养的作用及效能

设备保养是设备操作者和设备维修人员为了保持设备的正常技术状态，延长设备使用寿命所必须进行的日常工作，也是操作者和设备维修人员的主要职责之一。设备保养工作做好了，可以减少停机损失、降低维修量和维修费用，降低生产成本，保证产品质量，提高生产效率，给企业和个人都带来良好的经济效益，设备保养的作用及效能如图 1-2-1 所示。企业与操作者都应重视和加强设备的保养工作。

二、设备保养的类别

设备的管理方式不同，设备保养的类别也不同。分类方法如下：

1）按照设备在生产流程中的重要程度分类。如：关键、重点、普通（或关键、大型、普通）等。设备保养也按设备的重要程度进行分级保养。

2）按照设备价值进行分类。如主要设备、非主要设备和低值设备，设备保养则按设备的价值高低采取不同的保养方式。

3）按照时间周期定期对设备进行保养的分类方法。如：日常保养、一级保养和二级保养等。一般机械工厂常采用这种分类方式进行设备保养。

三、设备定期保养的内容和要求

为了保证设备处于良好的技术状态、安全状态，使环境影响达标，并延长设备的使用寿命，应对设备进行定期保养。

定期保养贯彻预防为主的原则，按照日常保养、一级保养和二级保养三级分类进行。

1. 设备的日常保养

设备日常保养包括每班保养和周末保养两种，由操作者负责进行。重点是清洁、润滑、检查并做好记录。

（1）每班保养　要求操作者在生产中必须做到班前对设备各部位进行检查。具体内容如下：

1）清洁全部外露面及工作台面。

2）检查各部分油位、液位是否正常。

3）检查刀库、刀具及各轴位置是否正常。

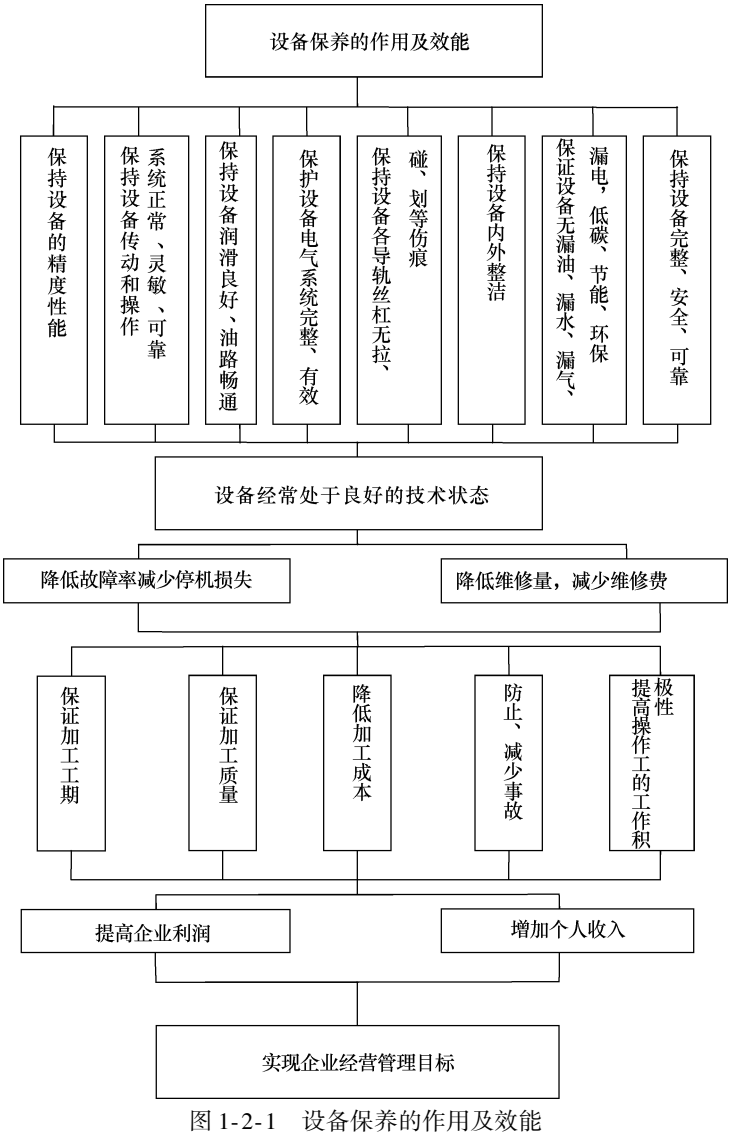


图 1-2-1　设备保养的作用及效能

4）检查电源电压是否正常。

5）上电试运行并检查以下项目：

① 有无报警信号。

② 上电后，设备的电、油、切削液、润滑系统、液压系统、冷却系统、气压系统、各部位的冷却风扇及过滤网、各调温和控温装置及散热器的数值、液位、运行是否正常。

6）做好上述内容的相关记录。

上述内容确认正常后方可使用设备。设备运行中操作者要严格按照操作规程正确使用设备，注意观察设备运行情况，发现异常及时处理，对于本人不能排除的故障应

及时报修，并督促维修人员在《维修记录单》上做好相关记录。

下班前的工作内容包括：

1）清洁切屑。

2）擦净机床各部位。

3）各部归位。

4）清除油水分离器中的水分。

5）做好相关记录，如下一班设备仍然运行，则与下一位操作者办好交接班手续。

（2）周末保养　主要是要求操作者在周末和节假日前用 1 ~ 2h 时间对设备进行彻底的清扫、擦拭、润滑和涂油。并按照整齐、清洁、润滑、安全四个方面进行检查。加工中心日常保养参考表 1-2-1。

设备的日常保养是设备保养的基础工作，必须做到规范化和制度化。

表 1-2-1　加工中心日常保养参考表

序号	检查周期	检 查 部 位	检 查 要 求
1	每天	润滑系统	检查润滑油的油面、油量，及时添加油，润滑油泵能否定时起动、工作及停止，导轨各润滑点在油泵工作时是否有润滑油流出
2	每天	*X*、*Y*、*Z* 轴及回旋轴导轨	清除导轨面上的切屑、冷却水渍，检查导轨润滑油是否充分，导轨面上有无划伤及锈斑，导轨防尘刮板上有无夹带切屑，如果是安装滚动滑块的导轨，当导轨上出现划伤时应检查滚动滑块
3	每天	压缩空气气源	检查气源供气压力是否正常，含水量是否过大
4	每天	机床进气口油水自动分离器和自动空气干燥器	及时清理油水分离器中滤出的水分，按规定加入适量润滑油，空气干燥器是否能自动切换工作，干燥剂是否饱和
5	每天	气液转换器和增压器	检查存油面高度并及时补油
6	每天	主轴箱润滑恒温油箱	恒温油箱正常工作，由主轴箱上油标确定是否有润滑油，调节油箱制冷功能能正常起动，制冷温度不要低于室温太多（相差 2 ~ 5℃即可，否则主轴上容易有空气中的水分凝聚）
7	每天	机床液压系统	油箱、液压泵无异常噪声，压力表指示压力正常，油箱工作油面在允许的范围内，回油路上背压不得过高，各管接头无泄露和明显振动
8	每天	主轴箱液压平衡系统	平衡油路无泄露，平衡压力指示正常，主轴箱上下快速移动时压力波动不大，油路补油机构动作正常
9	每天	数控系统及输入/输出	如：CF 卡接口、USB 接口（老机型用软盘驱动器）的清洁及连接是否正常
10	每天	电气装置及散热通风装置	机床电气柜（含数控柜）进、排气扇工作正常，风道过滤网无堵塞，主轴电动机、伺服电动机、冷却风道正常，恒温油箱、液压油箱的冷却散热片通风正常

（续）

序号	检查周期	检 查 部 位	检 查 要 求
11	每天	各种防护装置	机床导轨、活塞杆的防护罩动作应灵敏而无漏水，刀库防护栏杆及机床工作区防护栏的门开关动作应正常
12	不定期	各轴导轨上镶条，压紧滚轮，丝杠	按机床说明书规定调整
13	不定期	冷却水箱	检查水箱液面高度，切削液装置是否工作正常，切削液是否变质，经常清洗过滤器，疏通防护罩和床身上各回水通道，必要时更换并清理水箱底部
14	不定期	排屑器	检查有无卡位现象
15	不定期	废油池	及时取走废油以免外溢，当发现油池中油量突然增多时，应检查液压管路中的漏油点

2. 设备的一级保养

设备的一级保养是在专业维修人员的指导下，由设备操作工进行的定期保养工作，由设备管理部门以计划形式下达执行。单班制设备应每半年进行一次，双班制设备应每三个月进行一次，特殊设备的保养和要求另行规定。

加工中心一级保养的内容见表 1-2-2。

表 1-2-2　加工中心一级保养参考表（单班）

序号	检查周期	检 查 部 位	检 查 要 求
1	半年	外观	清洗设备外观，拆洗护罩、盖，要求：内外清洁，漆见本色铁见光。检查并补齐缺损的螺钉、手球及手柄
2	半年	各轴导轨	拆卸各轴导轨的防护罩，清除切屑、杂物，检查导轨润滑是否充分，导轨面上有无划伤、锈斑，防尘板处有无夹带切屑；若是滚动导轨，有划伤时应同时检查滚动滑块并清除毛刺
3	半年	检查润滑、冷却系统	检查油质、油量，清洁油路、油阀、油毡、油池、油标及过滤网，检查润滑油泵、切削液泵，清洁切削液箱，更换切削液
4	半年	楔铁间隙、传动带、张紧轮、丝杠副	检查调整各楔铁间隙，检查各部位压板、顶丝有无松动，检查传动带是否老化，更换传动带或调整其张紧情况。检查丝杠各点润滑是否畅通；清洗脂润滑的丝杠上的旧润滑脂，涂新润滑脂，清洗螺母防尘圈
5	半年	主轴箱及主轴恒温油箱	检查主轴箱各点是否正常供油，更换润滑油，清洗过滤器、换热器，检查恒温状况
6	半年	液压系统	清洗溢流阀、减压阀、滤油网、油箱，过滤器，更换液压油，清洁油箱

（续）

序号	检查周期	检查部位	检查要求
7	半年	电气箱及电动机	清洁电气箱内、外的尘土、污物，清洁电动机上的尘土，检查电柜空调（或换热器）是否正常
8	半年	主轴箱平衡系统	平衡锤结构的主轴箱平衡系统应检查钢丝绳紧固情况；液压平衡结构的主轴箱平衡系统应检查油路有无泄漏，压力是否正常，检查主轴箱快速运行时压力波动值，是否能正常补油

3. 设备的二级保养

设备的二级保养是由专业维修人员进行的定期保养工作，也是设备管理部门以计划形式下达执行的。单班制设备应每年进行一次，双班制设备应每半年进行一次，特殊设备的保养和要求另行规定。

加工中心二级保养的内容见表 1-2-3。

表 1-2-3　加工中心二级保养参考表（单班）

序号	检查周期	检查部位	检查要求
1	每年	外观	1. 同一级保养 2. 清洁光栅尺（或磁尺）
2	每年	各轴导轨的保养	1. 同一级保养 2. 对研伤的部位进行必要的修复
3	每年	检查润滑、冷却系统	1. 同一级保养 2. 换油 3. 更换易损件 4. 清洗或更换滤油器
4	每年	各轴镶条、张紧轮、丝杠副	1. 同一级保养 2. 按照机床说明书或工艺要求的规定对相应部位进行调整
5	每年	主轴箱及主轴恒温油箱	1. 同一级保养 2. 检查并修复主轴锥孔接触情况，去除毛刺
6	每年	液压系统	1. 同一级保养 2. 清洗或更换滤油器
7	每年	电气系统	1. 同一级保养 2. 在做好数据备份的情况下对各轴驱动进行清扫 3. 检查直流伺服电动机的电刷，必要时更换。并用无水酒精对换向器进行清洁，如有电蚀应进行抛光
8	每年	精度	1. 按照机床说明书的规定检查并调整机床的水平精度 2. 按照机床说明书的规定检查并调整机床的主要几何精度至出厂标准或满足企业生产工艺要求

第二篇　岗位基础知识

第一章

加工中心概述

第一节　加工中心的分类和组成

一、加工中心的分类

加工中心是在数控铣床上加装一个刀库和自动换刀装置，构成一个带自动换刀装置的数控机床。这类机床可以对工件实行一次安装定位，完成多工序的加工，打破了一台机床只能进行单一工种加工的概念。既避免了因多次装夹造成的误差，又减少了机床台数，提高了生产效率和加工自动化程度。

（1）加工中心常按主轴在空间所处的状态分类　可分为立式加工中心和卧式加工中心。加工中心的主轴在空间处于水平状态的称为卧式加工中心，处于垂直状态的称为立式加工中心，如图 2-1-1 和图 2-1-2 所示。

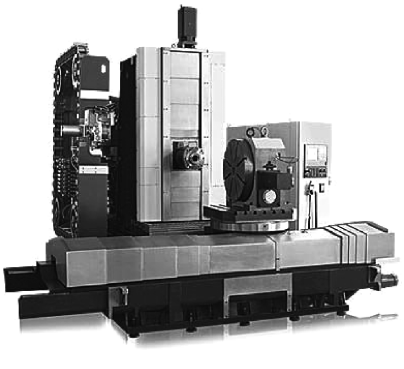


图 2-1-1　卧式加工中心

图 2-1-2　立式加工中心

主轴可作垂直和水平转换的，称为立卧式加工中心或五面加工中心，也称复合加

工中心。

（2）按加工中心立柱的数量分类　可分为单柱式和双柱式（龙门式）加工中心，双柱式加工中心如图 2-1-3 所示。

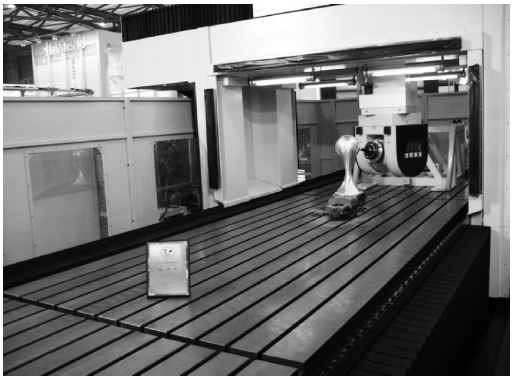


图 2-1-3　双柱式加工中心

（3）按加工中心运动坐标数和同时控制的坐标数分类　可分为三轴二联动、三轴三联动、四轴三联动、五轴四联动、六轴五联动等。三轴、四轴是指加工中心具有的运动坐标数，联动是指控制系统可以同时控制运动的坐标数，从而实现刀具相对工件的位置和速度控制。

（4）按工作台的数量和功能分类　可分为单工作台加工中心、双工作台加工中心和多工作台加工中心。

（5）按加工精度分类　可分为普通加工中心和高精度加工中心。普通加工中心的加工精度为 1μm，最大进给速度为 15 ~ 25m/min，定位精度在 10μm 左右。高精度加工中心的加工精度为 0. 1μm，最大进给速度为 15 ~ 100m/min，定位精度为 2μm 左右，可称为精密级加工中心。

二、加工中心的组成结构及特点

1. 加工中心的结构

加工中心自问世至今已有 30 多年，世界各国出现了各种类型的加工中心，虽然外形结构不尽相同，但从总体来看主要由以下几大部分组成，如图 2-1-4 所示。

（1）基础部件　基础部件是加工中心的基础结构，由床身、立柱、工作台和滑座组成，它们主要承受加工中心的静载荷以及在加工时产生的切削负载，因此必须要有足够的刚度。这些大件可以是铸铁件也可以是焊接而成的钢结构件，它们是加工中心中体积和重量最大的部件。

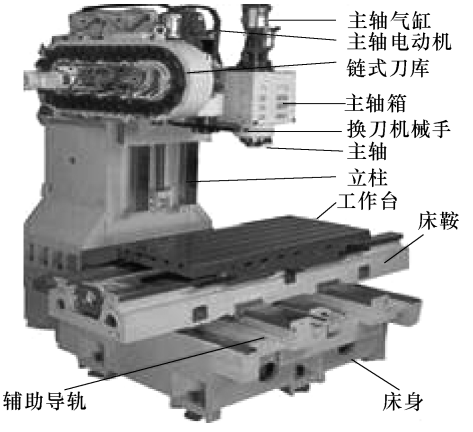


图 2-1-4　加工中心的结构

（2）主轴部件　主轴部件由主轴箱、主轴电动机、主轴和主轴轴承等零件组成。主轴的起动、停止和变速等动作均由数控系统控制，并且通过装在主轴上的刀具参与切削运动，主轴是切削加工的功率输出部件。

（3）数控系统　加工中心的数控部分是由 CNC 装置、可编程序控制器、伺

服驱动装置以及操作面板等组成。它是执行顺序控制动作和完成加工过程的控制中心。

（4）自动换刀系统　由刀库、机械手等部件组成，刀库形式有链式刀库和盘式刀库。带机械手的自动换刀系统还分为刀号与刀袋号一一对应的与随机的两种。当需要换刀时，数控系统发出指令，由机械手将刀具从刀库内取出装入主轴孔中。

不带机械手的自动换刀系统分为斗笠式和链式。斗笠式结构简单，换刀时间长，容量在 20 把刀左右；链式大多用在龙门式加工中心上。

（5）辅助装置　包括润滑、冷却、排屑、防护、液压、气动和检测系统等部分。这些装置虽然不直接参与切削运动，但对加工中心的加工效率、加工精度和可靠性起着重要的保障作用，是加工中心中不可缺少的组成部分。

2. 加工中心的特点

1）机床的刚度高、抗振性好。为了满足加工中心高自动化、高速度、高精度、高可靠性的要求，加工中心的静刚度、动刚度和机械结构系统的阻尼比都高于普通机床（机床在静态力作用下所表现的刚度称为机床的静刚度；机床在动态力作用下所表现的刚度称为机床的动刚度）。

2）机床的传动系统结构简单，传递精度高，速度快。加工中心传动装置主要为三种，即滚珠丝杠副；静压蜗杆副；预加载荷双齿轮-齿条。它们由伺服电动机直接驱动，省去齿轮传动机构。一般速度可达 15m/min，最高可达 100m/min。

3）主轴系统结构简单，无齿轮变速系统（特殊的也只保留 1～2 级齿轮传动）。主轴功率大，调速范围宽，并可无级调速。目前加工中心 95% 以上的主轴传动都采用交流主轴伺服系统，无级变速的速度调节范围为 10～20000r/min。驱动主轴的伺服电动机功率一般都很大，是普通机床的 1～2 倍，由于采用交流伺服主轴系统，主轴电动机功率虽大，但输出功率与实际消耗的功率保持同步，不存在“大马拉小车”的浪费电力的情况，因此其工作效率非常高，从节能角度看，加工中心又是节能型的设备。

4）加工中心的导轨都采用了耐磨损材料和新结构，能长期保持导轨的精度，在高速重切削时，可保证运动部件不振动，使低速进给时不爬行及保持运动中的高灵敏度。导轨一般和床身是一体铸造件，即铸造出导轨毛坯，然后通过刨、淬火和磨削等加工方式加工成导轨。也有导轨与床身不是一体的，比如镶钢导轨就是加工后钉接在床身上的。

5）设置有刀库和换刀机构。这是加工中心与数控铣床和数控镗床的主要区别，使加工中心的功能和自动化加工的能力提高了。加工中心的刀库容量少的有几十把，多的达上百把。这些刀具通过换刀机构自动调用和更换，也可通过控制系统对刀具寿命进行管理。

6）控制系统功能较全。它不但可对刀具的自动加工进行控制，还可对刀库进行控制和管理，实现刀具自动交换。有的加工中心具有多个工作台，工作台可自动交换，不但能对一个工件进行自动加工，而且可对一批工件进行自动加工。这种多工作台加

工中心又称为柔性加工单元。随着加工中心控制系统的发展，其智能化的程度越来越高，如 FANUC 16 系统可实现人机对话、在线自动编程，通过彩色显示器与手动操作键盘的配合，还可实现程序的输入、编辑、修改、删除，具有前台操作、后台编辑的功能。

三、加工中心的主要加工对象

加工中心适宜于加工形面复杂、工序多、精度要求较高、需用多种类型的普通机床和众多刀具夹具，且经多次装夹和调整才能完成加工的零件。其加工的主要对象有箱体类零件，复杂曲面，异形件，盘、套、板类零件和特殊加工共五类。

1. 箱体类零件

箱体类零件大多为铸件，一般起支承、容纳、定位和密封等作用，内外形状较为复杂。其主要结构有均匀的薄壁围成不同形状的空腔，空腔壁上还有多方向的孔。另外有加强筋、凸台、凹坑、铸造圆角、起模斜度等常见机构。箱体零件的表达方式常需要三个以上的视图，必要时还可以采用局部视图表达其结构。箱体类零件对重要的轴线、重要的端面、结合面及其之间应有几何公差的要求较高。箱体类零件如图 2-1-5 所示。

2. 复杂曲面

复杂曲面在机械制造业，特别是航天航空工业中占有特殊而重要的地位。复杂曲面采用普通机加工方法是难以甚至无法完成的。在我国，传统的方法是采用精密铸造，可想而知其精度是不高的。复杂曲面类零件如各种叶轮（图 2-1-6）、导风轮、各种曲面成型模具、螺旋桨以及水面航行器的推进器，这类零件均可用加工中心进行加工，编程工作量较大，大多数要有自动编程软件。

3. 异形件

异形件是外形不规则的零件。异形件的刚性一般较差，夹压变形难以控制，加工精度也难以保证，甚至某些零件的某些加工部位用普通机床难以完成。用加工中心加工时应采用合理的工艺措施，一次或两次装夹，利用加工中心多工位点、线、面混合加工的特点，完成多道工序或全部工序的加工。

4. 盘、套、板类零件

这类工件包括带有键槽和径向孔，端面分布有孔系、曲面的盘套或轴类工件。如：带法兰的轴套、带有键槽或方头的轴类零件等；具有较多孔加工的板类零件，如各种电动机盖等。

端面有分布孔系、曲面的盘类零件在加工时宜选择立式加工中心，有径向孔的零件在加工时可选卧式加工中心。

5. 特殊加工

在熟练掌握了加工中心的功能之后，配合一定的工装和专用工具，利用加工中心可完成一些特殊的工艺工作。如：在金属表面上刻字、刻线、刻图案；在加工中心的主轴上装上高频电火花电源，可对金属表面进行线扫描表面淬火；在加工中心上装高速磨头，可实现小模数渐开线锥齿轮磨削及各种曲线、曲面的磨削等。

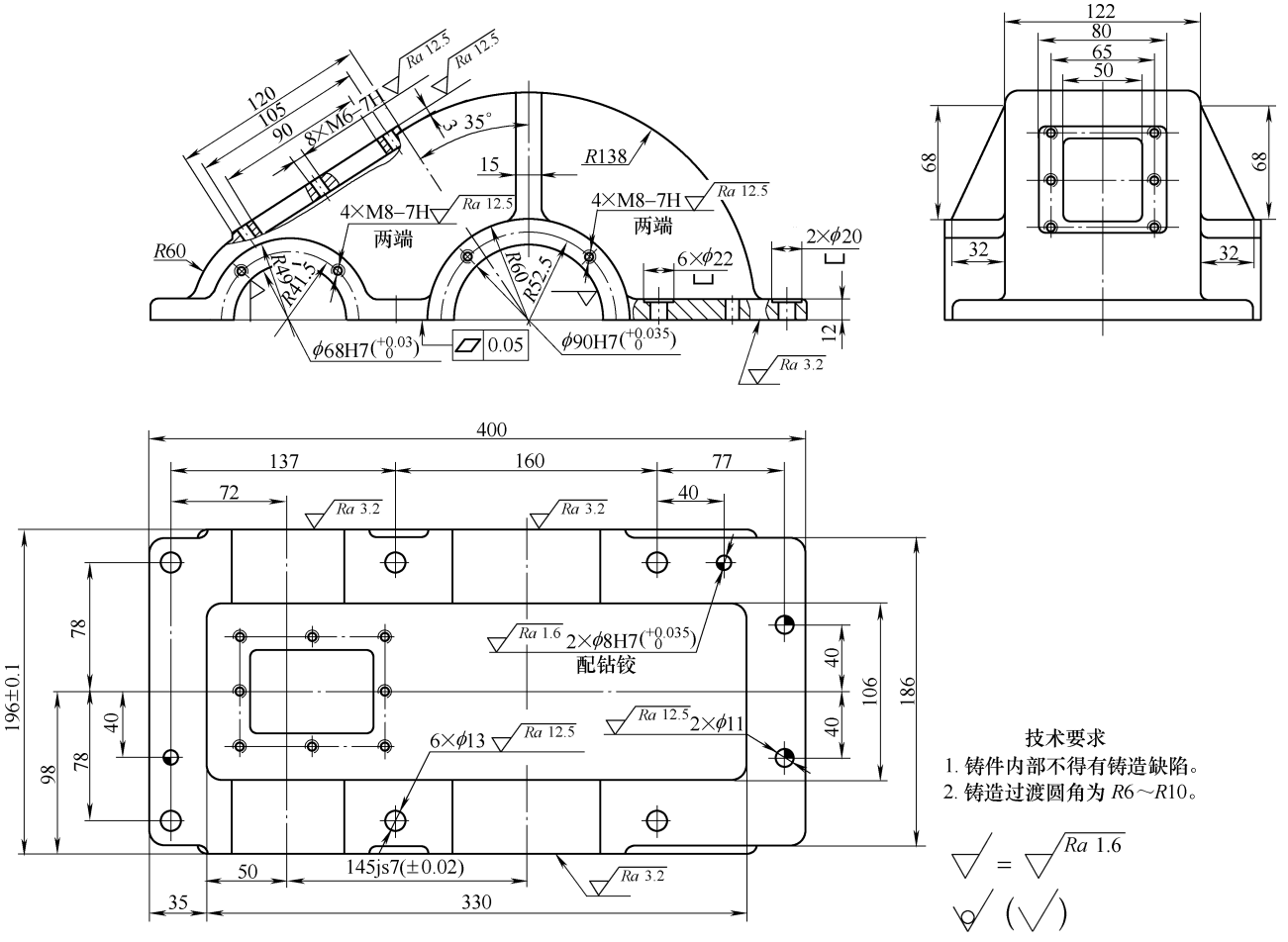

120
105
90
8×M6–7H
Ra 12.5
Ra 12.5
35°
15
R138
4×M8–7H
Ra 12.5
两端
4×M8–7H
Ra 12.5
两端
R60
R49.5
R41.5
R60
R52.5
6×φ22
2×φ20
12
φ68H7(+0.03 0)
0.05
φ90H7(+0.035 0)
Ra 3.2
122
80
65
50
68
68
32
32
400
137
160
77
72
40
Ra 3.2
Ra 3.2
Ra 1.6
2×φ8H7(+0.035 0)
配钻铰
Ra 12.5
2×φ11
6×φ13
Ra 12.5
78
40
78
196±0.1
98
40
106
186
50
145js7(±0.02)
35
330
Ra 3.2
技术要求
1. 铸件内部不得有铸造缺陷。
2. 铸造过渡圆角为 R6～R10。
Ra 1.6

图 2-1-5　箱体类零件

图 2-1-6　叶轮

第二节　加工中心的工作原理

根据零件图样制定工艺方案，采用手工或计算机自动编制零件加工程序，把零件所需的机床各种动作及全部工艺参数变成机床的数控装置能接受的信息代码，并把这些代码存储在信息载体上，将信息载体送到输入装置。读出信息并送入数控装置，或利用计算机与加工中心直接进行通信，实现零件程序的输入和输出。

进入数控装置的信息经过一系列处理和运算转变为脉冲信号。有的信号送到机床的伺服系统，通过伺服机构进行转换和放大，再经过传动机构，驱动机床有关零部件使刀具和工件严格执行零件程序所规定的相应运动。还有的信号送到可编程序控制器中用于顺序控制机床的其他辅助动作，实现刀具的自动更换。

第三节　螺 距 补 偿

目前，机床的传动结构一般均为滚珠丝杠副，当机床几何精度得到保证后，机床轴线的反向偏差与滚珠丝杠的螺距误差是影响机床定位精度与重复定位精度的主要因素，对机床轴线的反向偏差、滚珠丝杠的螺距误差进行补偿能极大地提高机床精度，机床控制系统也对这两个补偿参量设置了专门的参数，供轴线误差补偿之用，并将其补偿功能作为控制系统的基本控制功能。

一、螺距误差补偿的方式

由于加工设备的精度及加工条件的变化影响，滚珠丝杠都存在螺距误差。螺距误差补偿对开环控制系统和半闭环控制系统具有显著效果，可明显提高系统的定位精度和重复定位精度；对于全闭环控制系统，由于其控制精度高，螺距误差补偿效果不突出，但也可以进行螺距误差补偿，以便提高控制系统的动态特性，缩短机床的调试时间。

螺距误差补偿分为实时动态补偿和静态均化补偿两种方式。实时动态补偿也称为在线补偿，是一种借助机床配置的实时位置检测系统所测得的数值控制机床运动轴定

向的控制方法。这种补偿方式可显著提高机床的定位精度，但对机床系统要求较高，机床的成本也很高。

静态均化补偿是先将螺距误差的补偿值存储在数控系统参数表中，待补偿值生效后，数控系统自动将目标位置的补偿值叠加到插补指令上，均化误差部分，实现螺距误差的补偿。螺距补偿主要是静态均化补偿。

二、螺距误差补偿的依据与原理

螺距误差补偿的依据是国家标准 GB/T 17421.2—2000《机床检验通则　第 2 部分：数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定》。螺距误差补偿涉及补偿点的位置偏差，如图 2-1-7 所示。螺距误差补偿分为单向补偿和双向补偿。

图 2-1-7 中的 P_i 为测量目标点，$P_i\uparrow$、$P_i\downarrow$ 分别为双向趋近目标点时的实际位置：

$$X_i\uparrow = P_i\uparrow - P_i;X_i\downarrow = P_i\downarrow - P_i \qquad (2\text{-}1\text{-}1)$$

$$\overline{X_i}\uparrow = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}\uparrow;\overline{X_i}\downarrow = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}\downarrow \qquad (2\text{-}1\text{-}2)$$

$$P_i = P_i\uparrow + \overline{X_{ij}}\uparrow \qquad (2\text{-}1\text{-}3)$$

$$P_i = P_i\downarrow + \overline{X_{ij}}\downarrow \qquad (2\text{-}1\text{-}4)$$

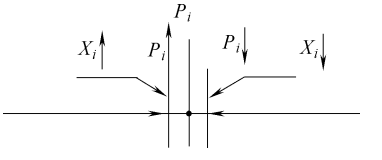


图 2-1-7　位置偏差

式（2-1-2）中，$n=5$；式（2-1-3）和式（2-1-4）即为机床轴线双向补偿的数学依据。上述各变量值存储在数控系统的参数中。

静态均化补偿法是借助数控系统控制功能的软件补偿法。根据数控系统的控制功能，螺距误差的软件补偿涉及以下几个关键变量：

1）机床轴线的参考点补偿点号。

2）轴线负端最远补偿点号。

3）轴线正端最远补偿点号。

4）轴线的补偿倍率。

5）轴线的补偿点间距。

补偿原理：补偿原点取各坐标轴的零点（参考点），以原点为中心设定补偿点，补偿间隔相等，并在补偿间隔的终点执行补偿。可以看出，静态均化补偿是一种统计补偿法，是以区间为单位进行补偿的，并不是实时位置点的补偿，与实时在线补偿有本质上的区别。

三、螺距误差的测量与补偿

下文以 FANUC 0i 系统为例，介绍螺距误差补偿的具体执行方法。螺距误差的测量与补偿有两种方式：手动测量与补偿，自动测量与补偿。手动测量与补偿借助步距规与千分表进行测量，然后将检测的计算值输入数控系统的参数中。手动方式很难实施，容易出错且效率低。所以目前主要以自动方式为主，自动方式一般采用激光干涉仪与补偿软件对机床轴线进行检测与自动补偿，如图 2-1-8 所示。

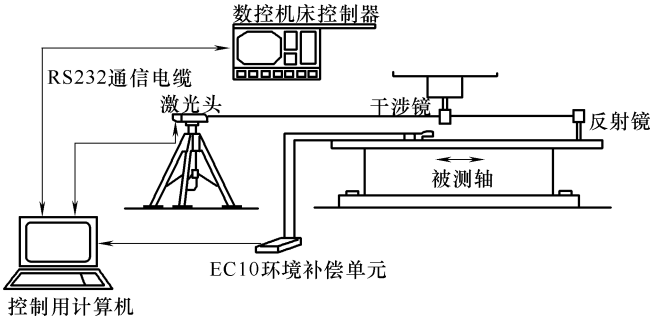


图 2-1-8　螺距误差补偿测量结构示意图

螺距误差补偿操作步骤如下：

1）备份 NC 中原螺距误差补偿数据文件，以供补偿前后对比分析。

2）清除原补偿数据（包括反向差值与各设定点螺距误差补偿值），生成 NC 运行程序，并传入 NC 中。

3）测量设定点的定位误差。

4）按指定间距生成新的补偿数据文件，并传入 NC 中。

5）比较补偿前后的测量数据与机床性能。

如果机床未配置自动补偿软件，则必须记录补偿前的补偿数据，并将生成的补偿数据手动输入 NC 参数中。

第四节　选购立式加工中心的几项指标

一、机械本体

机械本体的结构决定了机床的性能，其制造水平，装备质量直接影响以后的加工及精度。加工中心的各部件的稳定性直接影响机床精度的保持。机械本体材料一般为铸铁，据介绍有的公司使用的床身等部件在铸造完成后，需要放在冰冷的海水里浸泡两年，然后再进行加工，通过自然时效消除零件本身的铸造应力。

普通立式加工中心通常为固定立柱的 C 形结构。其优点是结构简单、占地面积小，缺点是刚性稍差。其他的还有动柱式、双立柱式等，对于一般用户来说选择 C 形结构的机床即可。

机床的自重是品质的保证。例如，同样台面尺寸的卧式加工中心，DMG 加工中心的质量只有 19t 左右，而 Huler Hille 公司的却达到 31t，差异很大，一般标准规格的立式加工中心（工作台面 750mm×550mm 左右）重量也要在 5t 以上。

1. 床身

选择床身时要注意以下几点：

1）两条导轨之间的距离应该尽可能宽，以保证滑座运动的刚性和稳定性。

2）床身结构以对称为好，以便在受热变形时均匀一致，抵消对机床精度的影响。

3）切屑应该能够尽快排出，避免堆积在床身上形成热源。

4）机床前部最好留有空间，以便手动叉车的前轮可以伸进去，方便上下运输工件。

2. 滑座

一般机床滑座的长度与重量远远大于工作台，*X* 轴导轨安装在滑座上，滑块安装在工作台下面。但是有一种轻型加工中心，*X* 轴导轨倒置在工作台下部，滑块安装在滑座上。滑座简化成一个薄片。用于精密加工的用户应慎选此类小滑座结构的机床。

3. 工作台

工作台的宽度可能导致一些工件不能在该机床加工，但是工作台的宽度受主轴箱长度的限制不能无限大，因此选择宽台面的机床时要考虑到主轴与立柱的结构刚性。

工作台上安装工件用的 T 形槽有的是三条，有的是五条。考虑到安装工件方便，选用五条较好，但不是必要条件。

4. 导轨

小型机床通常选用滚动导轨，优点是摩擦力小，移动速度快，通常刚性不如滑动导轨。立式加工中心 *Z* 向移动距离较短，对效率的影响较小；又因为主轴系统直接承受加工中的作用力，*Z* 向的刚性极为重要。因此，有些机床在 *Z* 向采用滑动导轨。

导轨具有不同的公差等级，不特别指出时，厂家通常只配 H 级（高级）导轨，实际上 P 级（精密级）更好。选择设备时要作详细了解。

导轨的截面越宽刚性越好；滑块大则滚动体大、滚动体与导轨的接触面也就大。因此，导轨越宽刚性越好。挑选设备时应当横向比较此项指标。

两条 *Y* 轴导轨之间的距离越宽则床身越宽，就增加了毛坯尺寸。

5. 导轨防护罩

对于高速机床此项尤其重要，国内机床附件供应商参差不齐，防护罩的材料、料厚、结构形式、价格差别很大，用户不可忽视。

6. 主轴箱

机械主轴转矩大，其最高转速在 12000r/min 左右。主轴与主轴电动机之间有直接驱动和带传动两种形式。其中直驱形式结构简单，振动小、噪声低，但是轴向尺寸长；带传动对于主轴电动机的保护简单可靠且轴向尺寸短，在电动机与主轴之间以同步带连接，同步带及同步带轮的质量直接影响机床的加工性能。主轴电动机功率最少要达到 7.5kW（连续运转）或 11kW（30min 短时），配置 11kW/15kW 的主轴电动机最好，但价格较高。

电主轴转速高但转矩小，实用的电主轴的转速已经可以达到 60000r/min。虽然结构简单、体积小，但是维护成本很高，每使用 20000h 就要送回厂家保养，为了使生产不间断常常要买两根主轴。

一般用户选用机械主轴即可。以下几点注意事项很重要。

1）常用的主轴转速在 6000 ~ 8000r/min，如果经常加工小直径孔（例如直径 1mm），就得选用最高转速 10000r/min 或以上的主轴了。

2）相同参数下，主轴轴承直径越大，轴承线速度越低、刚性越好、寿命越长。

3）主轴前端与刀柄连接的部位称作“主轴接口”，有形式和尺寸的区别。目前市场上主流机床匹配的接口主要有 BT 和 HSK 两种规格。

BT 刀柄市场保有量大，价格便宜，只是与其规格相当的 HSK 刀柄价格的 1/3 ~ 1/2。常用的规格为 BT40。HSK 刀柄常用的规格为 HSK63。

4）考虑到经济原因，在立式加工中心上选用 BT40 的刀柄也可满足使用要求。只是无论选择哪种刀柄，尽量要有中心出水功能，且出水压力需达到 1.5MPa 或以上。这对于将来提高生产效率至关重要。

5）主轴是最容易产生热的机床部件，主轴受热之后要伸长，轴承间隙要减少，除了影响加工精度以外，对于轴承寿命也有很大影响。

国外研究发现轴承寿命与轴承内、外环的温度有很大关系。某一种轴承，当其内、外环的温差为 0℃时，寿命为 20000h；内环温度低于外环温度 5℃时，寿命为 50000h；内环温度高于外环温度 5℃时，寿命为 5500h。因此，带有主轴冷却油路是高精度加工的重要条件。

7. 刀库

虽然无机械手式刀库机构简单、故障率低，但是换刀时间长。建议选择带机械手的刀库，投入资金增加得不多，但对于生产率的提高很重要。

8. 冷却系统

此处指的是加工时冷却工件与刀具的系统。需要注意机床外罩切削液的渗漏问题，考查切削液喷管的品牌质量。切削液箱上要有液位显示，移进与搬出要方便，便于清理。可以考虑带自动排屑器的切削液箱，以减轻操作者的劳动强度。

9. 润滑系统

润滑系统主要对主轴、导轨、丝杠等处的转动及传动进行润滑，分为脂润滑和油润滑两种。脂润滑是按部件分别进行的。

油润滑一般分为两套回路，一般由 PLC（可编程序控制器）自动控制。

1）专门对主轴进行的油雾润滑可以有效降低主轴温度，提高主轴轴承的使用寿命，建议选用。

2）对丝杠和导轨采用油润滑的好处是操作方便，便于观察润滑情况。提高了机床保养的可靠性。

10. 防护罩

1）防护罩的首要条件是不能漏水。

2）防护门要有一定的安全系数，两层有机玻璃中间加一层强力胶可获得比较好的结果。

3）正门上方有横梁的结构整体刚性好，但是影响天车吊装工件，因此首先要考虑好在生产中上下搬运工件的方法与设备。

4）防护门开关一定要轻快。

5）前部要有安装水枪、气枪的快插接头。

6）工作灯属于消耗品，其价格及灯泡的更换方法应作考虑。这些小零件的正品与赝品外观相差不大却价格悬殊，对于安全生产、提高效率影响很大。

7）电气柜内部布线是否合理、整洁在一定程度上反映电气设计质量的高低。柜内一定要带温度控制系统，这样可以有效地减少高温环境下机床的故障率，提高电气元件的使用寿命。

二、数控系统与伺服系统

数控系统的最大供应商是 SIEMENS 和 FANUC。FANUC 系统操作方便，功能齐全，质量稳定，市场占有量最大。但是 SIEMENS 系统功能强大，控制面板的操作稍繁琐，这也正是它功能全面、灵活性强的体现。熟练之后操作者反而更喜欢 SIEMENS 系统。

在立式加工中心上使用的 FANUC 系统主要有 FANUC 0i-MC 和 FANUC 0i-MD 两大型号。FANUC 0i-MD 为改进型，控制性能有进一步的提升，例如：实现了纳米插补，提高了轮廓精度及表面加工质量；增加了内存储量（由 256KB 增加到 512KB）；增加了互联网接口等，价格当然也较高。两种型号都有带 Mate 的简化版系统，不只是功能差，关键是驱动功率小，不建议选用。

数控系统型号确定之后，在配置上没有太大的选择余地。

如果选购日本产的机床，一定要在数控系统的功能选择方面多加注意，很多编程功能是选购项，订购合同时要写清楚需要哪些功能，否则后续新增功能时的花费非常高。

选择伺服系统时主要应考察主轴电动机、几个主轴的伺服电动机的功率和转矩等是否合适。

三、定位精度与重复定位精度

机床的定位精度是指机床的移动部件如工作台、刀架等在调整和加工过程中，根据指令信号，由传动系统驱动，沿某一坐标轴方向向目标位置移动一段距离时，实际位置与给定位置的接近程度。差距越小，说明精度越高，这是零件加工精度得以保证的前提。

重复定位精度，是指在数控机床上反复运行同一程序代码所得到的位置精度的一致度。对于某一目标位置，当给定指令使移动部件移动时，其实际到达的位置与目标位置之间总会存在误差，多次向该位置定位时，误差值不可能完全一致，误差值越小说明重复定位精度越高。

加工中心的定位精度和重复定位精度主要由数控系统和生产厂家在生产制造及机床调试过程中予以保证，但机床的定位精度和重复定位精度会随着机床的使用发生较大的变化，这就需要在机床的使用过程中定期地或在有必要的时候对定位精度和重复定位精度进行检测。

衡量定位精度与重复定位精度不要只看数值，重要之处在于执行什么标准，例如德国 VDI 标准计算方法比日本的 JIS 标准严格，因此尽管看起来数值偏大，实际精度还可能更高。另外，要问清楚测量时处在空载还是重载状态，避免在机床验收时产生纠纷。

四、快速移动速度

G0 速度又称快速移动速度（快速定位速度），此项指标并不一定等同于最大加工速度，如果不是在流水线上使用则不必太苛求此项指标。但是它的确可以衡量机床的先进程度。

五、加工中心换刀时间的确定

1. 机械手式换刀

机械手中已准备好下一把刀，主轴回到换刀参考点，主轴定向，从机械手将主轴上的刀具抓住开始计算时间，其间有主轴松开—机械手拔刀—机械手旋转—机械手将刀具插入主轴—主轴锁紧，这一过程所需要的全部时间称为换刀时间。

2. 无机械手换刀

以盘式刀库为例，主轴回到换刀参考点，主轴定向，首先将主轴上用过的刀具送回刀库，然后再从刀库中取出新刀具，这两个动作不能同时进行，所以换刀过程较为复杂，换刀时间相对较长。

3. 面与面之间的换刀

在五面铣加工中心中，同一刀具在立轴、卧轴之间交换，即在不同工作面之间的交换（图 2-1-9），以立轴、卧换刀为例，主轴回到换刀参考点，主轴定向，机械手将立轴上的刀具抓住开始计算时间，其间有主轴松开—机械手拔刀—机械手旋转—机械手将刀具插入卧轴—主轴锁紧，这一过程所需要的全部时间称为换刀时间。

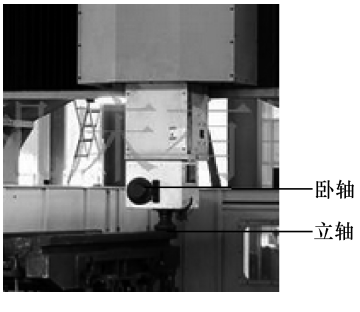


图 2-1-9　五面铣加工中心的立轴、卧轴

第二章
机 械 结 构

第一节　关键零部件的结构特点

一、床身

床身、立柱、滑座、工作台、主轴箱等均是加工中心的基础构件，基础构件的结构及布局是否合理直接影响机床的加工质量、机床可靠性及生产效率。这些基础构件的设计既要实现功能的要求，又要满足强度，静、动刚度和精度保持性的要求，同时又要保证良好的加工工艺性。

一般机床的床身上部安装有立柱、滑座等部件。根据机床结构的要求，床身基本上有以下两种方式。

（1）移动立柱式床身　移动立柱式床身可应用于卧式加工中心，也可应用于立式加工中心，如图2-2-1所示。它由横置的前床身（也叫横床身）和与它垂直的后床身（也叫纵床身）组成。前床身固装 Y 轴直线滚动导轨、Y 轴滚珠丝杠和 Y 轴伺服电动机。床身上还装有两个行程挡块，Y 轴校准点位置（$Y=0$）和 Y 轴行程的极限位置，就由这两个挡块配合行程开关来确定。后床身固定安装 X 轴直线滚动导轨、X 轴滚珠丝杠和 X 轴伺服电动机以及两个行程挡块。

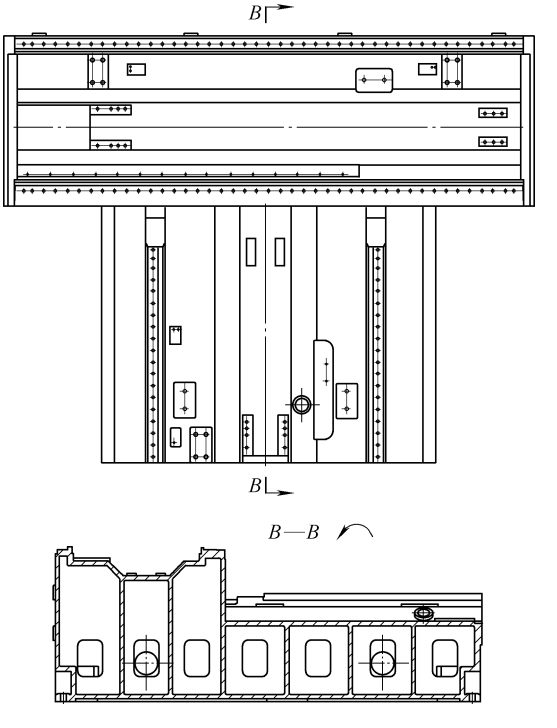


图2-2-1　移动立柱式床身

（2）固定立柱式床身　固定立

柱式床身多应用于立式加工中心，如图 2-2-2 所示。此种床身结构是立柱固定在床身后部，X、Y 轴的运动由床身前部的滑座及滑座上部的工作台完成。

床身是加工中心中体积和重量最大的零件。床身下部有垫铁，通过装在床身地脚处的调节螺钉，可调整使机床水平。机床必须安装在坚实的基础上。一般情况下应使用地脚螺栓加以固定，如图 2-2-3、图 2-2-4 所示。地基混凝土的强度等级为 300，厚度应在 300mm 以上，水泥的强度等级为 400。

小型机床或者机床长期只作轻度切削加工，则可以不用地脚螺栓固定，如图 2-2-5 所示。

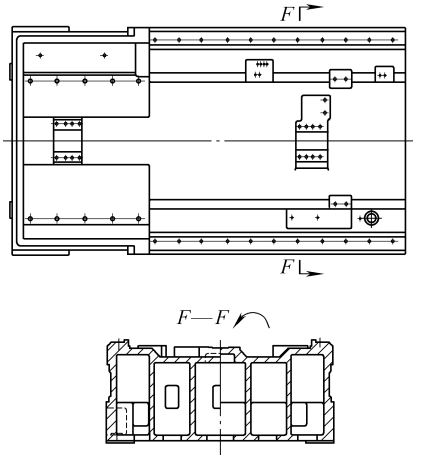


图 2-2-2　固定立柱式床身

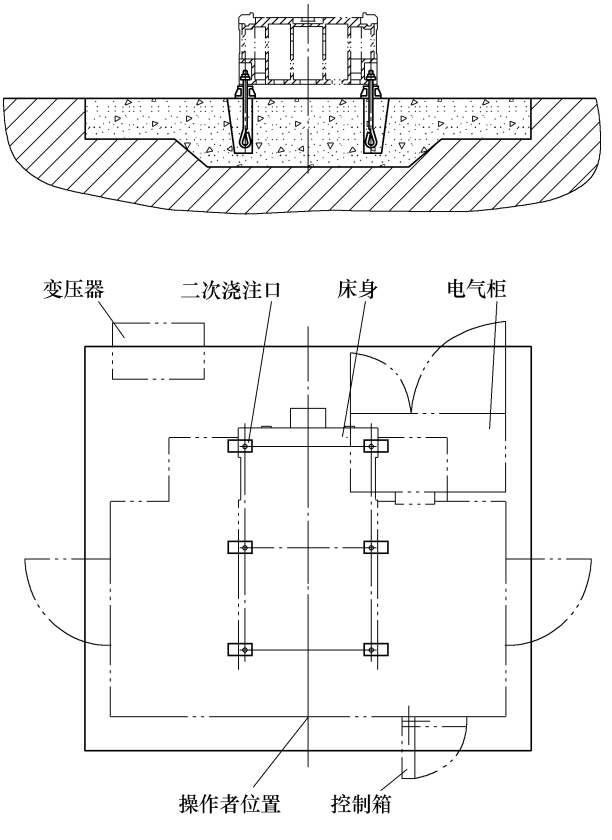


图 2-2-3　机床安装基础图

床身的设计还应该考虑排屑畅通、大罩子的安装及吊运安全等问题。床身可以由

高强度低应力铸铁铸成，也可以是焊接而成的钢结构件，随着新技术的产生，特殊要求的机床床身也可采用矿物材料或大理石材料铸成。

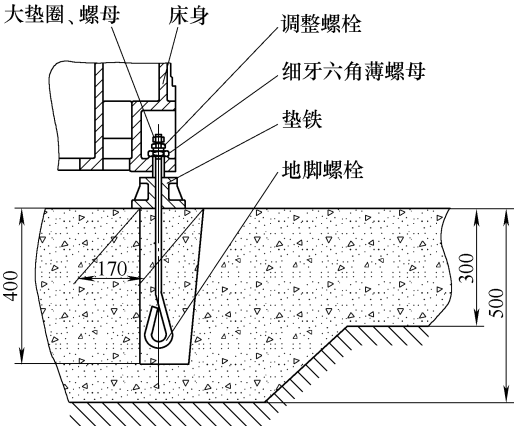


图 2-2-4　有地脚螺栓固定

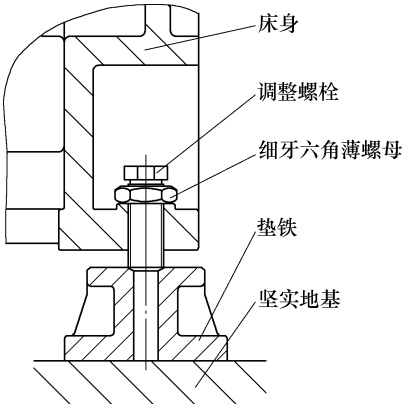


图 2-2-5　无地脚螺栓固定

二、滑座

立式加工中心的滑座通过导轨安装在床身上，工作台通过导轨安装在滑座上。滑座下部还安装 *Y* 轴滚珠丝杠螺母座。*Y* 轴伺服电动机带动丝杠旋转，可使滑座带着工作台沿 *Y* 轴方向作直线运动。滑座的上面与 *Y* 轴垂直的方向，安装 *X* 轴导轨、*X* 轴滚珠丝杠和 *X* 轴伺服电动机。*X* 轴伺服电动机带动丝杠旋转，可使工作台在滑座上方实现 *X* 轴方向的运动。滑座的上、下面需要考虑行程开关或撞块的安装。滑座的前面和后面分别装有防护罩，以对丝杠、导轨及光栅尺等进行防护。综上所述，滑座既是运动部件，又是支撑部件，所以其结构应具有足够的刚度又要有较高的刚度质量比。

三、工作台

工作台是数控机床伺服进给系统中的执行部件。立式加工中心与卧式加工中心的工作台结构形式是不相同的。

典型立式加工中心工作台的结构形式如图 2-2-6 所示。工作台装在滑板的上面，工作台底面安装 *X* 轴直线滚动导轨的滑块及滚珠丝杠螺母座。*X* 轴伺服电动机旋转，通

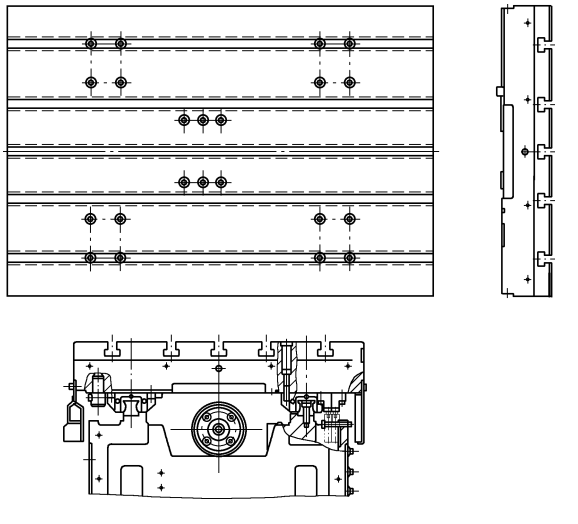


图 2-2-6　工作台

过滚珠丝杠螺母副带动工作台沿 X 轴作直线运动。工作台下面装有两个行程挡块，和行程开关配合，控制 X 轴校准点位置（$X=0$）和 X 轴行程的极限位置。

工作台上面有 T 形槽，供装夹工件、夹具、转台用。其中中间 T 形槽为基准 T 形槽，普通级立式加工中心基准 T 形槽和 X 轴轴线运动间的平行度：在 500mm 测量长度上为 0.025mm。工作台的左右两端均装有伸缩式防护罩。工作台属运动部件，既要重量轻，又要满足结构刚性的要求。

卧式加工中心通常带有可进行分度回转运动的正方形分度工作台，以便与卧式主轴配合实现工件的多面加工。若配置可自动交换的工作台，可使切削加工和辅助装卸工作同步进行，提高机床的有效利用率，降低生产成本。

四、立柱

（1）移动式立柱　移动式立柱目前普遍采用的是图 2-2-7 所示的框架结构形式。主轴箱装在双立柱的中间，沿立柱两侧的导轨上下运动。主轴承受切削力时力的作用点在立柱中央，因此立柱受转矩作用较小，加之立柱的对称形状，大大提高了刚度。双立柱框架结构形式热对称性好，主轴箱是机床的主要热源，而它正好处在双立柱的中间，使立柱结构成为热对称结构，这样就减小了热变形的影响。框架结构式立柱的缺点是制造工艺性差，装配、调试不方便。

（2）固定式立柱　固定式立柱一般采用封闭的箱形结构，其截面图如图 2-2-8 所示。主轴箱沿安装在立柱前的导轨上下运动，完成 Z 方向的运动。立柱内腔设计成中空，以便安装平衡主轴箱重量的平衡锤。目前用于平衡主轴箱重量的形式也可采用气动平衡或液氮平衡装置。

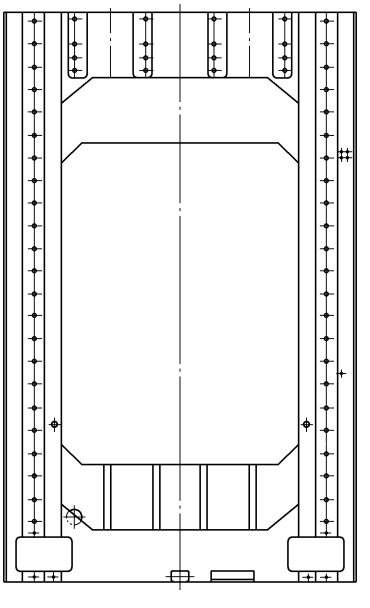


图 2-2-7　移动式立柱

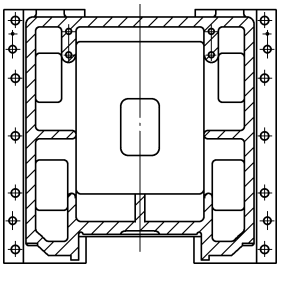


图 2-2-8　固定式立柱截面图

五、主轴系统

主轴系统是数控机床的核心部件，其动态特性是影响机床加工精度的主要原因之一。主轴系统由主轴箱、主轴组件、主轴电动机、传动零件、松刀机构、拉刀机构以及相应的附加机构组成，如图 2-2-9 所示。主轴箱的设计应满足主轴组件及主轴电动机及传动系统的安装，并保证刚度的要求。

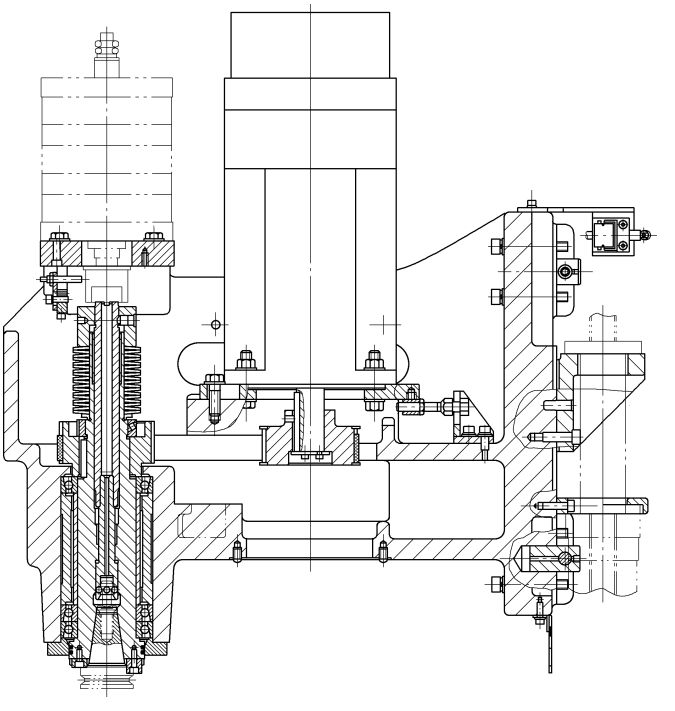


图 2-2-9　主轴箱部件

1. 对主轴系统的要求

（1）具有更大的调速范围并实现无级调速　为了保证加工时能选用合理的切削用量，从而获得最高的生产率、加工精度和表面质量，数控机床必须具有更大的调速范围。对于加工中心机床，为了适应各种工序和各种加工材料的要求，主轴系统的调速范围还应进一步扩大。

（2）具有较高的精度与刚度、传动平稳、低噪声　数控机床加工精度的提高与主轴系统具有较高的精度密切相关。采用精度高的轴承及合理的支承跨距等，可以提高主轴组件的刚度。

（3）良好的抗振性和热稳定性　数控机床加工时，可能由于断续切削、加工余量不均匀、运动部件不平衡以及切削过程中的自振等原因引起的冲击力和交变力的干扰，使主轴产生振动，影响加工精度和表面粗糙度，严重时甚至可能破坏刀具和主轴系统中的零件，使其无法工作。主轴系统的发热使其中所有零部件产生热变形，降低传动

效率，破坏零部件之间的相对位置精度和运动精度，造成加工误差。为此，主轴组件要有较高的固有频率、实现动平衡、保持合适的配合间隙并进行良好的循环润滑等。

2. 主轴的传动方式

主轴的功率和转矩取决于主轴电动机的功率和转矩以及传动系统的设计。主轴传动系统的设计以及主轴箱各部件的加工工艺直接影响机床的性能。

加工中心主轴一般有以下几种主要传动方式：

（1）变速齿轮的传动方式　通过几级齿轮降速，增大输出转矩，以满足主轴输出转矩特性的要求。大、中型数控机床采用此种传动方式较多，部分小型机床为获得强力切削时所需的转矩，也采用此种传动方式。

（2）带传动的传动方式　带传动方式是主轴电动机通过传动带和带轮将动力传递到主轴。带传动可避免齿轮传动引起的振动与噪声。加工中心上一般采用同步带传动。同步带分梯形齿同步带和圆弧齿同步带，如图 2-2-10 所示。

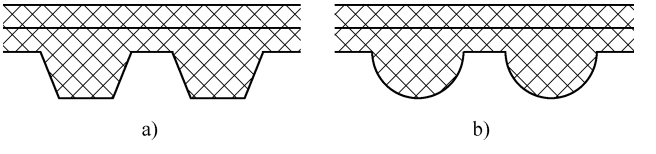


图 2-2-10　同步带

a）梯形齿同步带　b）圆弧齿同步带

梯形齿同步带在传递功率过程中应力集中在齿根部，受力情况不好。同时由于与带轮是圆弧形接触，在速度较高时，会产生较大的噪声与振动。而圆弧齿同步带克服了梯形齿同步带的缺点，均化了应力，改善了啮合，因此在加工中心上，无论是主传动还是伺服进给传动，总是优先考虑采用圆弧齿同步带。

（3）调速电动机直接驱动　主轴传动是由电动机通过联轴器与主轴直接相连，如图 2-2-11 所示，因而简化了主轴箱体与主轴的结构，有效提高了主轴部件的刚度。但主轴输出的转矩小，电动机发热对主轴精度的影响较大。一般用于对主轴转速要求高的场合。

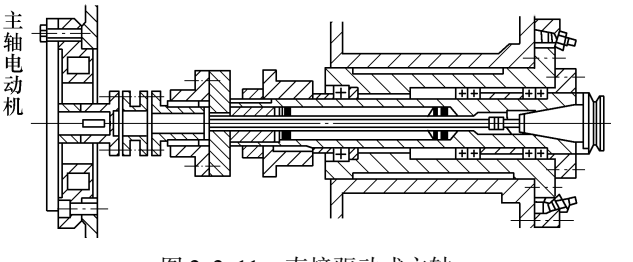


图 2-2-11　直接驱动式主轴

3. 主轴部件

主轴部件由主轴、主轴轴承、安装在主轴上的传动元件及主轴的密封件组成。机床加工时，主轴带动刀具直接参与表面成形运动，所以主轴的精度、刚度和热变形对加工质量及生产效率有着重要的影响。

（1）主轴的旋转精度　主轴旋转时由于各种因素的影响，旋转中心线并不是固定不变的。旋转中心线的空间位置每一瞬间都在变化。这些瞬时旋转中心线的平均空间位置成为理想旋转中心线。瞬时旋转中心线相对于理想回转中心线在空间的位置距离，就是主轴的旋转误差。

目前大多采用静态测量法测量主轴的旋转精度，即用一个精密的检验棒插入主轴锥孔中，用千分表测头触及检验棒的素线，低速转动主轴进行测量，如图 2-2-12 所示。

千分表读数的最大、最小差值即为主轴的径向旋转误差，也即径向圆跳动。普通级加工中心的径向圆跳动近端不许超过 0.007mm，300mm 处不许超过 0.015mm。

旋转误差的轴向周期性窜动公差为 0.005mm，测量方法如图 2-2-13 所示。

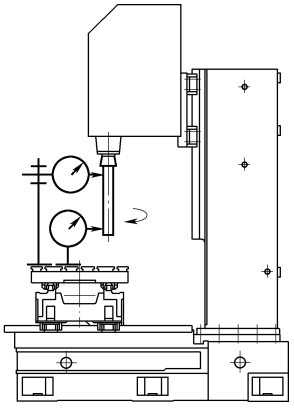


图 2-2-12　径向圆跳动的测量

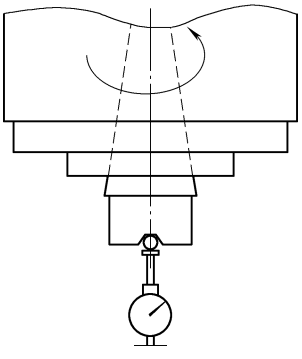


图 2-2-13　周期性窜动的测量

（2）主轴部件的刚度　主轴部件的刚度是指受外力作用时，主轴抵抗变形的能力。通常以主轴前端产生单位位移时，在位移方向上所施加作用力的大小来表示。主轴部件的刚度与主轴结构尺寸、支承跨距、所选用的轴承类型及配置方式、轴承预紧力的调整及主轴上传动元件的位置有关。

（3）抗振性　主轴部件的抗振性是指切削加工时，主轴保持平稳地运转而不发生振动的能力。主轴组件抗振性差，工作时容易产生振动，不仅降低加工质量，而且限制了机床生产率的提高，使刀具的使用寿命下降。提高主轴抗振性必须提高主轴部件的静刚度。

（4）温升　主轴部件在运转中，温升过高会引起两方面的不良结果：一是主轴部件和箱体因热膨胀而变形，主轴的回转中心线和机床其他件的相对位置会发生变化，直接影响加工精度；二是轴承等元件会因温度过高而改变已调好的间隙和破坏正常润滑条件，影响轴承的正常工作，严重时甚至会发生“抱轴”。采用主轴中心出水及恒温主轴箱是解决主轴部件温升过高的有效办法。

（5）耐磨性　主轴部件必须有足够的耐磨性，以便能长期地保持精度。主轴上易磨损的地方是刀具的安装部位，即主轴锥孔。为了提高耐磨性，主轴的上述部位应该淬硬，或者经过氮化处理以提高其硬度，主轴轴承也需有良好的润滑。

4. 主轴

主轴是主轴部件的重要组成部分。图 2-2-14 所示为立式加工中心的主轴结构。

主轴的结构尺寸和形状、制造精度、材料及其热处理对主轴部件的工作性能都有很大的影响。主轴结构随主轴系统设计要求的不同而有各种形式。主轴主要尺寸参数包括主轴直径、内孔直径、悬伸长度和支承跨距。评价和考虑主轴主要尺寸参数的依据是主

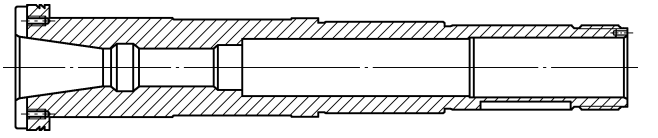


图 2-2-14　立式加工中心的主轴结构

轴的刚度、结构工艺性和主轴部件的工艺适用范围。主轴材料的选择主要根据刚度、载荷特点、耐磨性和热处理变形大小等因素确定。主轴材料常用的有 45 钢、40Cr、38CrMoAlA、GCr15 等，不同的主轴材料需进行渗氮、渗碳和感应淬火等不同的热处理。

5. 电主轴

加工中心主轴的驱动方式有齿轮传动驱动、同步带传动驱动和电动机直接驱动。它们分别适用于大、中、小转矩的场合，但若用于主轴高速切削，会出现振动、噪声大、传动带打滑、转动惯量大等缺点，而电主轴的结构形式适合高速加工。

所谓电主轴就是将电动机的转子直接作为机床的主轴，实现电动机与机床主轴的一体化。电主轴一般由主轴单元、轴承、润滑单元、主轴冷却单元及动平衡单元组成。基本结构如图 2-2-15 所示。

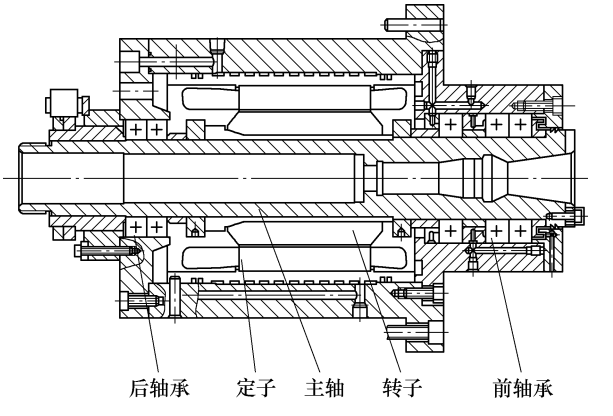


图 2-2-15　电主轴结构

常用电主轴一般采用角接触球轴承支承。轴承的配置形式由载荷的大小、载荷的方向、主轴的转速决定。轴承的滚珠一般采用陶瓷材料，以减小质量。滚珠的直径也尽量减小。

电主轴最突出的问题就是发热问题。所以一般在电动机定子的外面加一层带螺旋槽的冷却套。加工工件时，冷却水不断地从螺旋槽中流过并带走热量。

电主轴结构紧凑，质量和惯量小，起动、停止响应快，但结构比较复杂，对组成零件的要求也很高，所以成本比较高。

六、转台

数控回转工作台除了可以进行圆弧加工或与直线进给联动进行曲面加工外，还可以实现精确分度。数控回转工作台可任意回转和分度，由角度编码器控制，因此能够达到较高的分度精度。

卧式加工中心的工作台一般都是旋转工作台，卧式主轴与旋转工作台相配合，可以在一次装夹后就能完成各种垂直面的加工。

立式加工中心工作台为长方形，具有三个直线运动坐标，无分度回转功能。如

在工作台上安装一个水平轴的数控回转台，就可以加工螺旋线类或叶片等零件。

数控转台单轴的有立式、卧式、立卧两用等种类，还有双轴转台。立式加工中心工作台上若安装双轴转台，即可进行五轴联动加工。

七、导轨

1. 机床导轨的功能及要求

机床导轨的功能是导向和承载，即保证运动部件在外力作用下，能准确地沿着一定的方向运动。机床导轨的质量在一定程度上决定了机床的加工精度和使用寿命。机床导轨必须具有高的导向精度和良好的低速运动平稳性。

影响导轨导向精度的主要因素有导轨的几何精度、导轨的刚度及导轨的耐磨性。若刚度不足，直接影响部件之间的相对位置，使导轨面上的压强分布不均，加剧导轨的磨损。导轨的耐磨性是决定导向精度能否长期保持的关键，是衡量机床质量的重要指标。导轨的耐磨性受导轨副的材料、润滑条件、载荷性质、运动速度影响。低速运动的平稳性要求运动部件在导轨上低速运动或微量位移时不会发生“爬行”现象，否则将使加工零件的表面粗糙度值增大。低速运动的平稳性与导轨的结构、润滑条件、摩擦性质及传动系统的刚度有关。

2. 导轨的分类及特点

加工中心上常用的导轨按摩擦性质的不同可分为滚动导轨、滑动导轨及静压导轨三大类。滚动导轨用于要求定位精度高、移动均匀、灵敏的数控机床。滑动导轨用于重型机床及有强力切削要求的机床。静压导轨多用于重型机床。

（1）滚动导轨　目前加工中心常用的是直线滚动导轨，其外形和结构如图 2-2-16 所示。

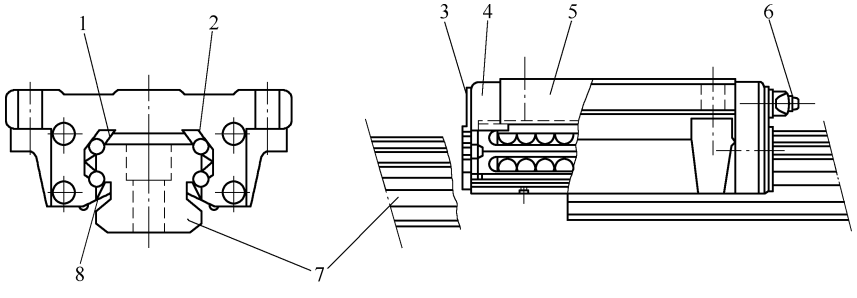


图 2-2-16　直线滚动导轨

1—保持架　2—负荷滚珠　3—防尘垫片　4—端部挡板　5—单元轴承壳体
6—润滑油接嘴　7—轨道　8—侧面垫片

导轨体固定在不动部件上，滑块固定在运动部件上。当滑块与导轨体相对运动时，钢球沿着导轨体与滑块之间的圆弧直槽滚动，在滑块端部钢球通过反向器进入反向孔后再进入滚道。钢球如此不断循环滚动，就实现了滑块与导轨的相对移动。滑块两端装有防尘密封端盖，以防止灰尘及脏物进入滑块及导轨滚道。滑块两端还有润滑油注

入孔，以便定期注油实现润滑。

滚动导轨的动、静摩擦系数相近，摩擦系数小，磨损小，摩擦阻力小，响应速度快，低速运动平稳性及精度保持性好，定位精度高；承载能力大，刚度高；能实现高速运动。由于直线滚动导轨均由专业厂家生产，且对导轨安装面要求不是很高，所以机床设计中采用直线滚动导轨可简化设计、制造和装配工作，质量容易保证。

（2）滑动导轨　滑动导轨是机床上最早使用的导轨，其结构简单，刚度好，抗振性强，制造方便，经济性好，故仍得到广泛应用。

滑动导轨的截面形状有矩形、三角形、燕尾形和圆柱形，如图 2-2-17 所示。矩形导轨的 *M* 面既导向又承载，*J* 面防倾覆，*N* 面起导向作用；三角形导轨 *M* 和 *N* 面兼起导向和支承作用；燕尾形导轨的 *M* 面起导向和压板作用，*J* 面为支承面。

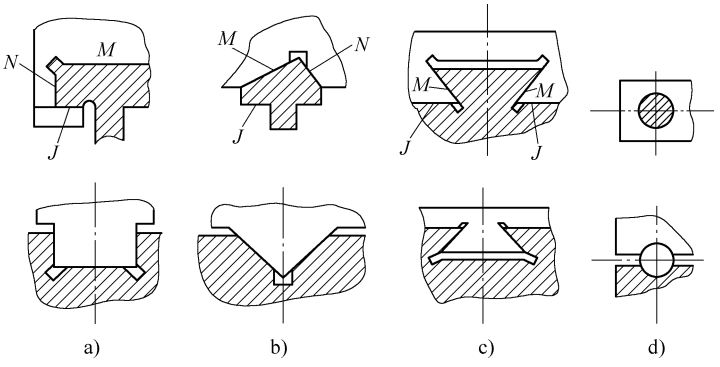


图 2-2-17　滑动导轨常见的截面形状

a）矩形导轨　b）三角形导轨　c）燕尾形导轨　d）圆柱形导轨

每种截面形状的导轨均有凸形和凹形。凹形导轨润滑条件好，但必须有良好的防护装置，常用于移动速度较快的运动部件。凸形导轨不易积存脏物，也不易存油，必须有良好的润滑条件，常用于移动速度较小的运动部件。滑动导轨一般由两条导轨组成。目前加工中心上采用的主要形式是矩形导轨配矩形导轨。导轨副的材料对导轨的性能起着决定性的作用。传统的铸铁-铸铁和铸铁-淬火钢的导轨副，静摩擦系数大，动摩擦系数随速度变化而变化，摩擦损失大，低速时易出现“爬行”现象，运动平稳性及定位精度差。现在较为常用的是铸铁-塑料或镶钢-塑料滑动导轨。塑料导轨摩擦系数低而稳定，动静摩擦系数相近，运动平稳性好，有自润滑功能，吸振性好。

（3）静压导轨　静压导轨大都用于矩形平导轨。在静压导轨相对运动的导轨面间通入液压油，运动部件浮起。工作时，导轨面上油腔中的油压能随外加负载的变化自动调节，以平衡外加负载，保证导轨面间始终处于纯液体摩擦状态。所以静压导轨的摩擦系数极小，消耗功率小，导轨不会磨损，因而导轨的精度保持性好，寿命长，油膜厚度几乎不受速度的影响，油膜承载能力大，刚性高，吸振性好，导轨运行平稳，既无爬行，也不会产生振动。但静压导轨结构复杂，并需要一套有过滤装置的液压装置，制造成本高。目前，静压导轨较多应用于大型、重型数控机床上。

3. 导轨的养护

（1）导轨的润滑　无论是滑动导轨还是滚动导轨都需要定期润滑，以降低摩擦系数，减少磨损，防止导轨面生锈。滑动导轨采用润滑油润滑，滚动导轨根据要求可采用润滑油润滑，也可采用润滑脂润滑。最简单的润滑方法是人工定期直接注油或用油杯注油，这种方法简单，成本低，但不可靠。目前大多采用自动润滑方式，即采购专门的润滑系统，通过润滑泵强制、定期地给导轨供给压力油进行润滑。

（2）导轨的防护　为防止切屑、切削液、灰尘等对导轨的污染，根据具体的工作环境，应配备不同形式的导轨防护罩，如刮板式、卷帘式、风琴式及层叠式防护罩。导轨防护罩不能碰撞，更不能踩踏。

八、轴承

加工中心上所用的轴承主要是主轴轴承和丝杠两端的支承轴承。

1. 主轴轴承

主轴轴承是主轴部件的重要组成部分，它的类型、结构、配置、精度、安装、调整和润滑都直接影响主轴组件的工作性能。在数控机床上主轴轴承常用的有滚动轴承和滑动轴承。

（1）滚动轴承　滚动轴承摩擦阻力小，可以预紧，润滑维护简单，能在一定的转速范围和载荷变动范围下稳定地工作。滚动轴承由专业化工厂生产，选购、维修方便。在加工中心上被广泛采用。特别是大多数立式主轴和主轴装在套筒内能够作轴向移动的主轴。这时滚动轴承可以用润滑脂润滑以避免漏油。但与滑动轴承相比，滚动轴承的噪声大，滚动体数目有限，刚度是变化的，抗振性略差并且对转速有很大的限制。

为了适应主轴高速发展的要求，滚珠轴承可采用陶瓷滚珠。由于陶瓷材料的重量轻，热胀系数小，耐高温，所以陶瓷滚珠轴承具有离心力小、动摩擦力小、预紧力稳定、弹性变形小及刚度高的特点。但由于成本较高，在数控机床上还未普及使用。随着材料工业的发展，制造成本的下降，今后也会是广泛使用的一种轴承。

滚动轴承根据滚动体的结构分为球轴承、圆柱滚子轴承、圆锥滚子轴承三大类。机床主轴最常用的滚动轴承就是角接触球轴承，如图 2-2-18 所示。这种类型的轴承既可承受径向载荷，又可承受轴向载荷。接触角有 15°、25°和 40°三种。15°接触角多用于轴向载荷较小、转速较高的场合；25°和 40°接触角多用于轴向载荷较大的场合。调整内、外圈的相对轴向位移，实现预紧。角接触滚子轴承多用于高速主轴。为了提高轴的刚度和承载能力，可以采用多个轴承不同方式组合使用。

（2）滑动轴承　在数控机床上最常使用的滑动轴承是静压滑动轴承。静压滑动轴承的油膜压强是由液压缸从外界供给的，它和主轴转与不转、转速的高低无关（忽略旋转时的动压效应）。它的承载能力不随转速而变化，而且无磨损，起动和运转时摩擦阻力力矩相同，因此静压轴承的刚度大，回转精度高，但静压轴承需要一套液压装置，成本较高。

（3）主轴轴承的配置　主轴轴承的选型及结构配置主要根据所设计主轴部件在转

速、承载能力、刚度以及精度方面的要求，图 2-2-19 所示为几种典型主轴轴承结构配置。

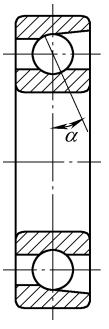


图 2-2-18　角接触球轴承

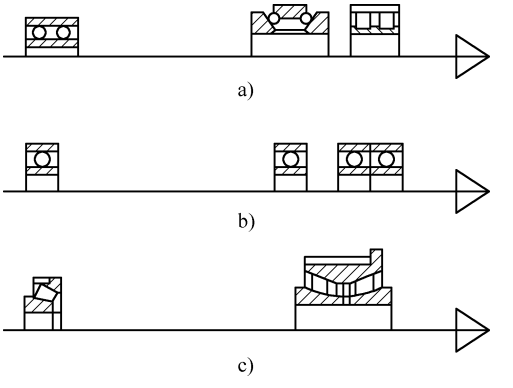


图 2-2-19　主轴轴承常见的支承形式

（4）主轴轴承的预紧　所谓轴承的预紧，是使轴承滚道预先承受一定的载荷，消除间隙并使滚动体与滚道之间发生一定的变形，增大接触面积，轴承受力时变形减小，抵抗变形的能力增大。对主轴滚动轴承合理选择预紧量并合理进行预紧，可以提高主轴部件的回转精度、刚性及抗振性。但预紧量过大，会导致发热、轴承磨损、承载能力下降。

2. 丝杠轴承

目前滚珠丝杠安装都采用丝杠专用的推力角接触球轴承，其结构如图 2-2-20 所示。

这是一种能够承受很大轴向力的特殊角接触球轴承，与一般角接触球轴承相比，接触角增大到 60°，增加了滚珠的数目并相应减小了滚珠的直径。这种结构的轴承相比于一般轴承的轴向刚度提高了两倍以上。该产品成对出售，而且在出厂时已经选配好内、外环的厚度。装配调试时只要用螺母和端盖将内环和外环压紧，就能获得出厂时已经调整好的预紧力，使用很方便。

3. 轴承的润滑

加工中心上，主轴轴承的润滑有油脂润滑、稀油润滑、油雾润滑和油气润滑，具体的润滑方式需根据主轴转速及轴承的工作环境选择。丝杠轴承的润滑也有油脂润滑、稀油润滑两种方式。

九、滚珠丝杠副

加工中心的进给系统，是指将伺服电动机的旋转运动变为工作台直线运动的整个机械传动链。而滚珠丝杠副就是实现这一转化的最常用的传动机构。

1. 滚珠丝杠副的结构与特点

滚珠丝杠螺母副（简称滚珠丝杠副）是一种在丝杠与螺母间装有滚珠作为中间元件的丝杠副，其结构原理如图 2-2-21 所示。

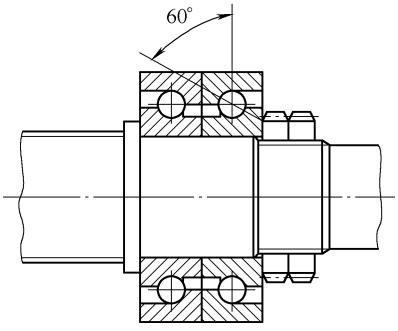


图 2-2-20　推力角接触球轴承

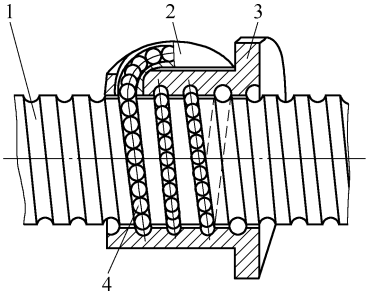


图 2-2-21　滚珠丝杠副

1—丝杠　2—滚道　3—螺母　4—滚珠

其优点是传动效率高、摩擦损失小；运动平稳，无爬行，传动精度高；磨损小，精度保持性好，使用寿命长；具有运动的可逆性，可以将旋转运动转换成直线运动，也可将直线运动转换成旋转运动。滚珠丝杠副的缺点是：由于结构复杂，丝杠和螺母等元件的加工精度和表面质量要求高，因此制造成本高；由于不能自锁，特别是垂直安装的滚珠丝杠传动，会因部件的自重而自动下降，当部件向下运动且切断动力源时，由于部件的自重和惯性，滚珠丝杠不能立即停止运动，因此必须增加制动装置。滚珠丝杠副按其中滚珠的循环方式可分为以下两种：

（1）外循环　滚珠在循环过程结束后，通过螺母外表面上的螺旋槽或插管返回丝杠螺母间重新进入循环。图 2-2-22 所示为常见的外循环式滚珠丝杠结构。在螺母外圆上装有螺旋形的插管口，管子的两端插入滚珠螺母工作始末的两端孔中，以引导滚珠通过插管形成滚珠的多圈循环链。这种类型的结构简单，工艺性好，承载能力较高，但径向尺寸较大。目前，这种类型滚珠丝杠副的应用最为广泛，也可用于重载传动系统。

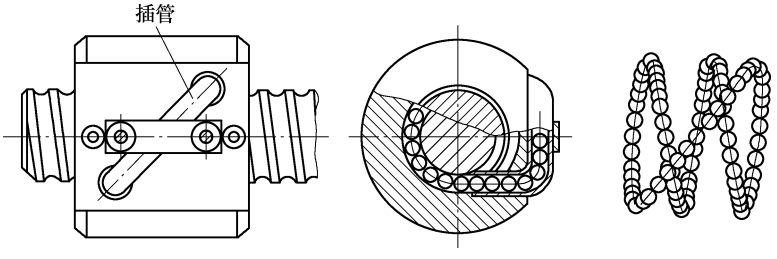


图 2-2-22　外循环式滚珠丝杠结构

（2）内循环　内循环式滚珠丝杠结构如图 2-2-23 所示，它靠螺母上安装的反向器接通相邻滚道，使滚珠成单圈循环。反向器 2 的数目与滚珠圈数相等。这种类型的结构紧凑，刚度好，滚珠流通性好，摩擦损失小，但制造较困难，适用于高灵敏、高精度的进给系统，不宜用于重载传动。

2. 滚珠丝杠副间隙的调整方法

滚珠丝杠的传动间隙是轴向间隙，其数值是指丝杠和螺母无相对转动时，二者之间的最大轴向窜动量，除了结构本身的游隙之外，还包括施加轴向载荷后产生的弹性变形所造成的轴向窜动量。

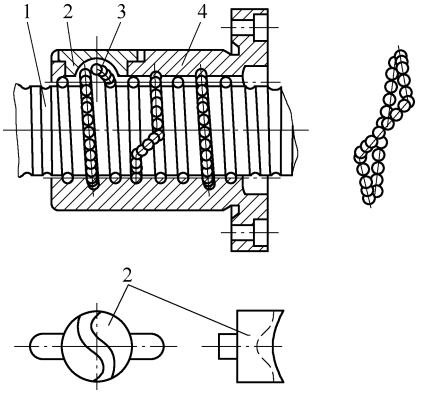


图 2-2-23　内循环式滚珠丝杠结构
1—丝杠　2—反向器　3—滚珠　4—螺母

由于存在轴向间隙，当丝杠反向转动时，将产生反向误差，从而影响传动精度和轴向刚度。通常采用预加载荷（预紧）的方法来减小弹性变形所带来的轴向间隙，以保证反向传动精度和轴向刚度。但过大的预加载荷会增大摩擦阻力，降低传动效率，缩短使用寿命。因此，一般需要经过多次调整，以保证既消除间隙又能灵活运转。调整时，除螺母预紧外还应特别注意使丝杠安装部分的间隙尽可能小，并且具有足够的刚度，同时应注意预紧力不宜过大。

双螺母通常采用垫片调隙法，螺纹调隙法，齿差调隙法；单螺母通常采用变位螺距预紧，单螺母螺钉预紧。滚珠丝杠副在出厂时，生产厂家已经施加过预载荷，用户不需要再进行调整。

3. 滚珠丝杠的支承

数控机床的进给系统要获得较高的传动刚度，除了加强滚珠丝杠副本身的刚度外，滚珠丝杠的正确安装及支承结构的刚度也是非常重要的因素。如为减少受力后的变形，螺母座应有加强筋，并且要连接可靠。另外，采用高刚度的推力角接触球轴承并合理配置可提高滚珠丝杠的轴向承载能力。

滚珠丝杠有以下几种支承方式，如图 2-2-24 所示。

图 2-2-24a 所示为仅一端安装角接触球轴承的方式。这种安装方式的承载能力小，轴向刚度低。一般用于进给轴较短或垂直坐标进给传动结构。

图 2-2-24b 所示为一端安装角接触球轴承，另一端安装深沟球轴承的方式。此种方式用于丝杠较长的情况，当热变形造成丝杠伸长时，其一端固定，另一端能作微量的轴向浮动。

图 2-2-24c 所示为两端安装角接触球轴承的方式。这样做有助于提高刚度，但对热变形较为敏感。所以这种安装方式要对丝杠进行预拉伸安装。

4. 滚珠丝杠副的维护

（1）支承轴承的定期检查　应定期检查丝杠与固定件的连接是否有松动以及支承轴承是否损坏等。如有以上问题，要及时紧固松动部位并更换支承轴承。

（2）滚珠丝杠副的润滑和防护　滚珠丝杠副的螺母上设计有注油孔，要定期给滚珠丝杠副注入润滑油或润滑脂，以提高耐磨性及传动效率。滚珠丝杠副不能暴露在外面，一定要用防护罩、防护套等保护好。

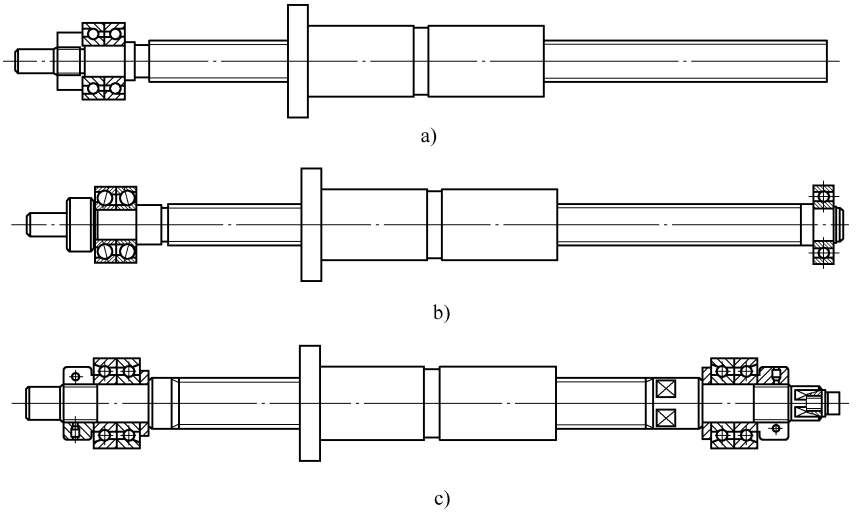


图 2-2-24　滚珠丝杠的支承方式

a）一端支承，一端悬伸　b）一端固定，一端支承　c）两端固定

十、刀库的种类与特点

刀库是用来存储加工刀具及辅助工具的机构。配备刀库是加工中心区别于数控铣床的特征。刀库应满足刀具存储量足、换刀时间短、刀库占地面积小、换刀灵活及安全可靠等基本要求。

1. 刀号与刀袋号

加工中心所用的每把刀具都有其特定的功能，为了与加工程序一一对应，对每把刀具都要进行编号，且不得重复。每把刀具的编号即为刀号。加工中心的刀库一般能容纳十几把到几十把甚至上百把刀具。刀具通过刀袋安装在刀库上。每个刀袋都要按顺序进行编号，即所谓的刀袋号。

2. 没有机械手的刀库

没有机械手的刀库，一般是把刀库固定在主轴箱可以运动到的位置，或整个刀库运动，使某一刀位正好能够移动到主轴箱可以到达的位置。同时，刀库中刀具的存放方向与主轴箱的装刀方向一致。换刀时，通过主轴和刀库的相对运动进行换刀动作，利用主轴的运动取走或放回刀具。没有机械手的刀库优点是结构简单，成本低，换刀可靠性高。但由于刀库本身是运动部件，所以刀库本身的结构及刀具的数量、重量均受到一定的限制，且换刀时间长。

3. 有机械手的刀库

有机械手的刀库，其配置、位置及刀具数量的选用要比没有机械手的刀库灵活得多。并且换刀时间短，所以采用机械手进行刀具交换的方式应用最为广泛。机械手的形式也是多种多样的，机械手可以是单臂的、双臂的，还有双机械手等。最常用的是单臂双爪回转式机械手，如图 2-2-25 所示。这种机械手的手臂两端各有一个夹爪，两个夹爪可同

时抓取刀库及主轴上的刀具，回转180°后又同时将刀具放回刀库及装入主轴。

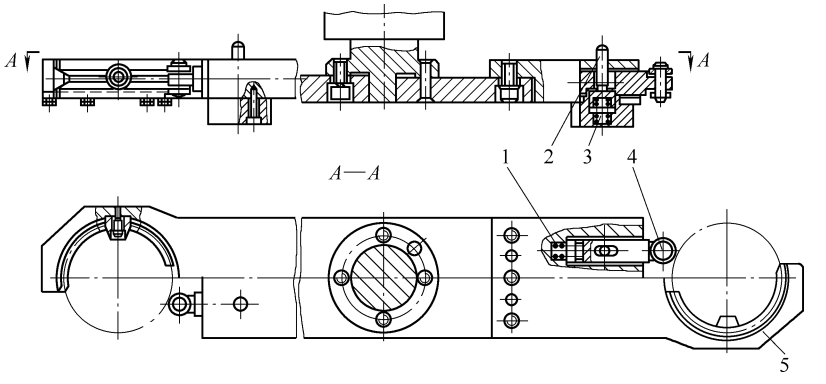


图 2-2-25　单臂双爪回转式机械手

1，3—弹簧　2—锁紧销　4—活动销　5—固定爪

4. 刀号与刀袋号固定的刀库

刀号与刀袋号固定的刀库，即对每个刀袋都进行编号，刀具也编号，并且必须要一一对应，装刀时一定要将刀具放到与其号码相符的刀袋中。换刀时根据加工程序的要求，刀库旋转，使各个刀袋依次经过识别器，直至找到规定的刀袋，刀库便停止旋转。在换刀过程中必须将用过的刀具放回到原来的刀袋中，这样就增加了换刀的动作。

5. 刀号与刀袋号随机的刀库

刀号与刀袋号随机的刀库，其实是利用软件选刀。随机换刀控制方式需要在 PLC 内部设置一个模拟刀库的数据表，表内设置的数据表地址与刀库的刀袋位置号及刀具号相对应，刀具号与刀袋位置（地址）被记忆在数控系统的 PLC 中。刀库上装有位置检测装置（与电动机装在一起），可以检测出每个刀袋的位置。此后随着加工换刀，换上主轴的新刀具号以及还回刀库中的旧刀具号，均在 PLC 内部有相应的刀袋号存储单元记忆，无论刀具放在哪个刀袋内都始终记忆着它的刀袋号变化踪迹。这样就可以实现刀具的任意取出及送回。例如，当 PLC 接到寻找新刀具的指令（T××）后，在模拟刀库的刀号数据表中进行数据检索，检索到 T 代码给定的刀具号，将该刀具号所在数据表中的表序号存放在一个地址单元中，这个表序号就是新刀具在刀库的目标位置。刀盘旋转后，测得刀袋的实际位置与刀袋目标位置一致时，即识别了所要寻找的新刀具，刀库停转并定位，等待换刀。在执行 M06 指令时，机床主轴准停，机械手执行换刀动作，将主轴上用过的旧刀和刀库中选好的新刀进行交换。

第二节　影响系统刚性的因素

机械加工是一个系统工程，影响系统刚性的因素除了机床整体结构外，还包括刀具、夹具、工艺和维修等多个方面。

1. 机床整体结构

1）机床的基础大件如床身、立柱、主轴箱、滑座、工作台等支撑构件的材料选用、结构设计及制造工艺均是影响机床刚性的主要因素。

2）主轴单元主轴部件的刚性是最基础的也是最重要的环节，包括主轴轴承的选用及轴承的安装方式。

3）伺服驱动技术的应用、机床调试参数的设置对机床动态刚度性能有非常大的影响。

2. 刀具系统

加工中心的刀具要承受很高的温度和摩擦力。刀柄部分必须具备刚性好、传递转矩大、体积小、平衡好、承受高的加速和减速及应力集中等特性。刀具几何角度和刀具结构的设计要合理。在影响系统刚性的因素中，刀具材料及刀具制造技术起着决定性的作用。

3. 夹具系统

夹具系统的刚性直接影响工件的表面质量。工件直接安装在夹具上，如果夹具系统的刚性不足，刀具在高速旋转进行切削时，切削部位就成为整台设备的振动源。设备的丝杠系统、导轨系统、床身受振动源的影响会产生受迫振动。如果机床各部件的振动较大，就会对加工产生非常不利的影响，对高精度加工更是有致命性的影响。

4. 工艺系统

机床切削不同材料的工件时，所用的刀具、工艺方法、切削用量均有很大的不同。所以工件加工工艺参数的合理性也是影响系统刚性的重要因素。

第三章
数 控 系 统

数控系统（Numerical Control System）：用数值数据的控制系统，在运行过程中，不断地引入数值数据，从而实现机床加工过程的自动控制。数控系统的基本组成包括控制器和驱动装置（引自 JB/T 8832—2001《机床数控系统　通用技术条件》）。

数控系统早期是由硬件电路构成的，称之为硬件数控（Hard NC）。20 世纪 70 年代以后，硬件电路元件逐步由专用的计算机替代，称之为计算机数控系统（Computerized Numerical Control，简称 CNC）。

计算机数控系统是采用计算机控制零件的加工过程，实现数值控制的系统。因为采用计算机替代原先用硬件逻辑电路组成的控制装置，所以输入数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种复杂机能都可以通过计算机完成。根据计算机存储器中存储的控制程序，通过用数字、文字、符号组成的数字指令对设备进行控制。

第一节　数控系统的作用

一、数控系统的作用

1. 数控系统的组成

数控系统由计算机数控装置、可编程序控制器、输入/输出装置（I/O 装置）、数控加工程序、主轴驱动装置、进给驱动装置、检测反馈系统等组成。

1）计算机数控装置（NC 装置）。NC 装置是数控机床实现自动加工的核心，主要由计算机系统、位置控制板、PLC 接口板，通信接口板、特殊功能模块以及相应的控制软件等组成。

2）可编程序控制器（PLC 装置）。是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境应用而设计的。它采用一类可编程序的存储器，用于其内部存储程序，执行逻辑运算，顺序控制，定时，计数与算术操作等面向用户的指令，并通过数字或模拟式输入/输出控制各种类型的机械或生产过程。

3）输入/输出装置（I/O 装置）。采集外部的信号状态/控制外部执行元件装置。

4）数控加工程序。根据工件要求编制，数控系统能够进行处理的 NC 加工程序。

5）主轴和进给轴电动机（伺服电动机）/驱动装置。连接机械执行机构，驱动其动作。

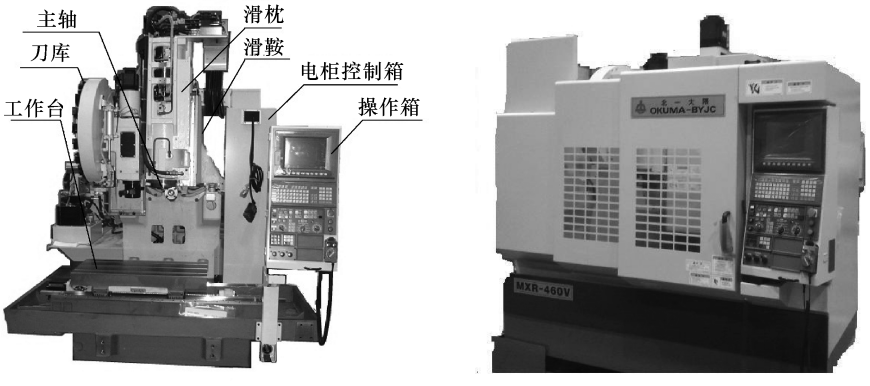
6）检测反馈装置（编码器/光栅尺）。能够随时根据检测到的位置信息对驱动机构进行跟踪修正。

2. 数控系统的工作原理及作用

数控系统是加工中心的重要组成部分，控制机械执行机构的运动及其他动作。

如图 2-3-1a 所示，数控系统的计算机数控装置被安装到了操作箱中，驱动装置及 I/O 装置和其他电气部件被安装到了电柜控制箱中，机械执行机构包括丝杠、导轨、工作台、滑枕和滑鞍，还有刀库等其他机构。

如图 2-3-1b 所示，加工中心必须有外围防护，以保证机床的安全性。



a)　　b)

图 2-3-1　数控加工中心

a）防护未安装，装配中的状态　b）防护已安装，出厂状态

（1）工作原理　控制系统将输入的数据进行处理运算、判断，发出控制指令到伺服驱动系统；伺服驱动系统根据指令发出执行信号给各个伺服电动机，电动机带动工作台、刀具或者主轴等各执行机构动作（这些动作包括主轴运动、进给运动、刀库、托盘站的交换等）；可编程序控制器（PLC）根据计算机数控装置（CNC）的动作要求和输入装置（I/O）的信号状态，通过电气回路控制外部的辅助机构（电磁阀、电动机等）按照预定的要求进行工作；检测反馈装置检测机械机构的运动位置和速度，并反馈至控制系统用以修正控制指令。

（2）作用　数控系统将接收到的信息译码后，进行相应的运算、处理，然后发出控制命令，使刀具实现相对运动，完成零件的加工过程。信息包含：数控加工程序、I/O 装置的状态、来自联网的外部设备信息等。

二、数控系统的工作过程

数控系统工作过程大致如图 2-3-2 所示，首先将数控加工程序输入到 CNC 中，然

后经过译码、数据处理、插补、位置控制等环节，由伺服驱动系统执行 CNC 输出的指令，驱动机床完成零件的加工。

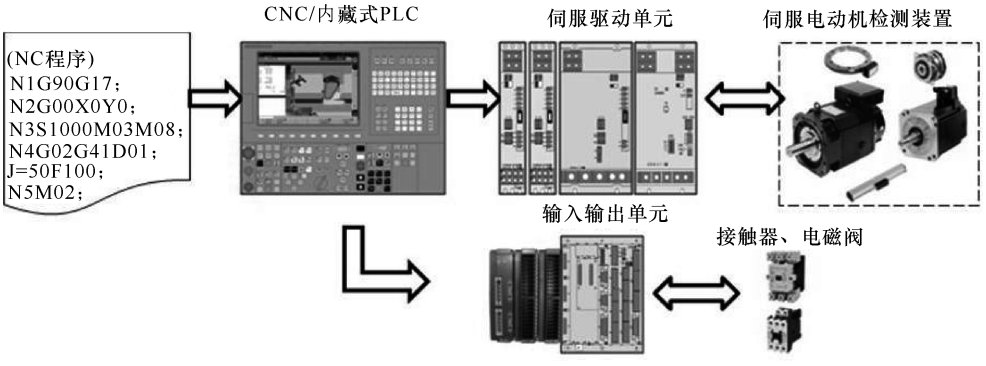


图 2-3-2　数控系统工作过程

1. 输入

数控加工程序及控制参数、补偿量等数据，可采用键盘、U 盘或者连接计算机服务器的 DNC 接口、网络等多种形式进行输入。CNC 装置在输入过程中通常还要完成无效码的删除、代码校验和代码转换等工作。

如图 2-3-2 所示，将数控加工程序通过 NC 键盘输入到数控系统的 NC 程序存储区。

2. 译码

不论系统工作时处于 MDI 还是自动运行方式，都是将零件程序以一个程序段为单位进行处理，把其中的各种零件轮廓信息（如起点、终点、直线或圆弧等）、加工速度信息（F 代码）和其他辅助信息（M、S、T 代码等）按照一定的语法规则解释成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用单元。在译码过程中，还要完成对程序段的语法检查，若发现语法错误便立即报警。

如图 2-3-2 所示，在自动运行模式下选择该程序后，启动程序进行加工。系统对 NC 程序的内容进行处理，编译成计算机能够识别的语言（二进制代码）。

3. 刀具补偿

刀具补偿包括刀具的长度补偿和刀具的半径补偿。

长度补偿是将刀具的长度补偿到系统中，使刀具在加工中其刀尖始终处于编程要求的位置。其主要用于钻头、铣刀等刀具在长度 Z 方向的补偿。

半径补偿是将刀具的半径补偿到系统中，在加工轮廓时刀具的切削刃始终处于编程要求的位置。通常数控加工程序以零件轮廓轨迹编程，刀具补偿作用是把零件轮廓轨迹加上刀具的补偿后转换成刀具中心轨迹。

如图 2-3-3 所示，系统在进行处理时会将刀具的半径补偿（G41 D01）补偿到运算的结果中，形成刀具最终的移动轨迹。

4. 进给速度处理

编程所给的刀具移动速度，是在各坐标的合成方向上的速度。速度处理首先要做的工作是根据合成速度来计算各运动坐标的分速度。在有些 CNC 装置中，对于机床允许的最低速度和最高速度的限制、软件的自动加速和减速等也在这里处理。

图 2-3-3 中的 NC 程序在刀具运行的轨迹中，*X* 轴、*Y* 轴在圆周上的合成速度是 F100，但是 *X* 轴和 *Y* 轴方向的速度是始终在变化的。

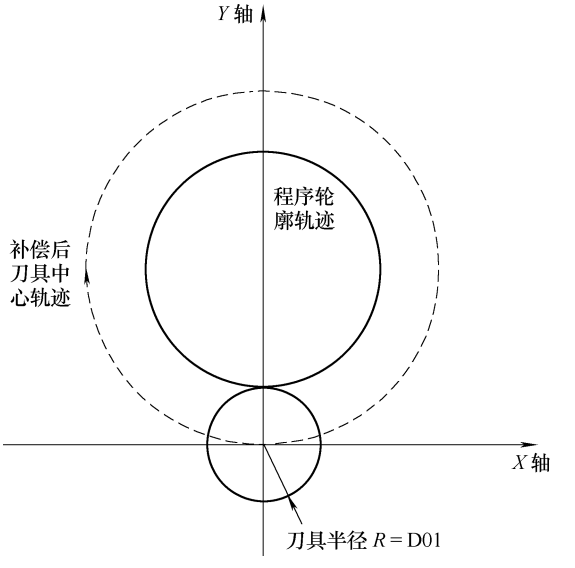


图 2-3-3　刀具半径补偿后刀具中心的移动轨迹

5. 插补

插补的任务是在一条给定起点和终点的直线/曲线上进行“数据点的密化”。插补程序在每个插补周期运行一次，在每个插补周期内，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。通常，经过若干次插补周期后，插补加工完一个程序段轨迹，即完成从程序段起点到终点的“数据点密化”工作。

图 2-3-3 所示的圆周方向的运动实际上可以换为若干点的轨迹。

如果将该运动轨迹放大后，如图 2-3-4 所示，箭头所指是插补的若干个点，最终拟合成图中的圆弧。

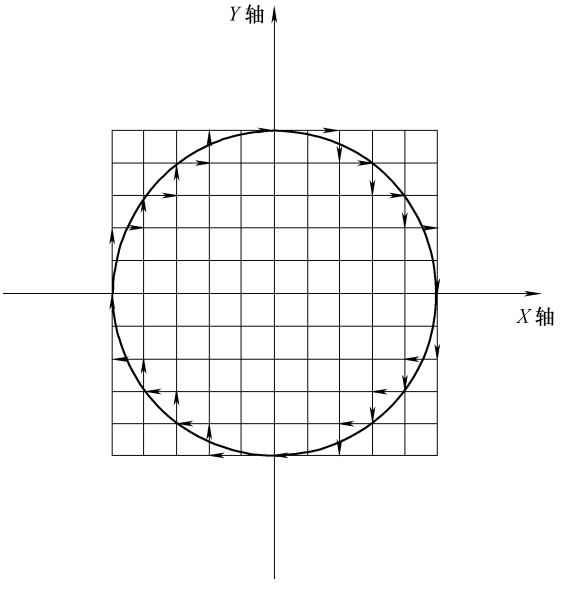


图 2-3-4　G02 顺时针圆弧插补

6. 位置控制

位置控制处于伺服控制回路的位置环上。这部分工作可以由软件实现，也可以由硬件完成。它的主要任务是在每个采样周期内，将理论位置与实际反馈位置相比较，用其差值去控制伺服电动机。在位置控制中通常还要完成位置回路的增益调整、各坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿，以提高机床的定位精度。

伺服驱动单元接收到 CNC 的指令后，驱动伺服电动机或者主

轴进行旋转。同时，将编码器或者光栅尺反馈的信息和指令进行比较，随时调整伺服电动机和主轴电动机的旋转角度。

7. I/O 处理

I/O 处理主要处理 CNC 装置面板开关信号，机床电气信号的输入、输出和控制（如换刀、主轴换挡、吹气及冷却等）。

当 NC 程序运行到 M08 时，PLC 将指令输出到 I/O 单元，切削液电动机开始工作。当程序运行结束后，PLC 按照要求切断该输出信号，切削液电动机停止工作。

8. 显示

CNC 装置的显示主要为操作者提供方便，通常用于零件程序的显示、参数显示、刀具位置显示、机床状态显示、报警显示等。有些 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静态和动态的三维图形显示。

9. 诊断

对系统中出现的不正常情况进行检查、定位，包括联机诊断和脱机诊断。

如图 2-3-5 所示，如果出现故障，报警信息及相关的诊断信息都可以在显示画面中进行显示，用户可以根据显示信息进行分析处理。

诊断画面根据方法的不同可以有很多种，主要有以下几种。

（1）直接报警信息　一般出现在屏幕的顶端，用红色作标识性颜色进行警示。

图 2-3-5　直接报警画面

（2）帮助信息　帮助信息针对于当前报警内容，如图 2-3-6 所示。它可以指导操作者排除故障，找到故障的原因。

（3）专用诊断画面　专用诊断画面可以向用户提供当前报警时一些相关的前后故障信息。比如换刀时发生报警，报警信息共有几条，都是哪些内容，换刀进行到了第几步骤，出现了哪些故障码等，如图 2-3-7 所示。

（4）PLC 诊断画面　可以让用户在 PLC 梯形图中检查信号的状态，排除故障的原因如图 2-3-8 所示。

（5）I/O 诊断画面　I/O 诊断画面如图 2-3-9 所示，它可以让操作者在输入输出信号的地址清单画面内检查各信号的状态，同时根据电气回路图的连接，排除硬件回路中是否有故障。比如接线出现脱落、接触不实造成信号没有接通的故障。也可以在该画面内对部分信号进行强制操作，从而排除故障。

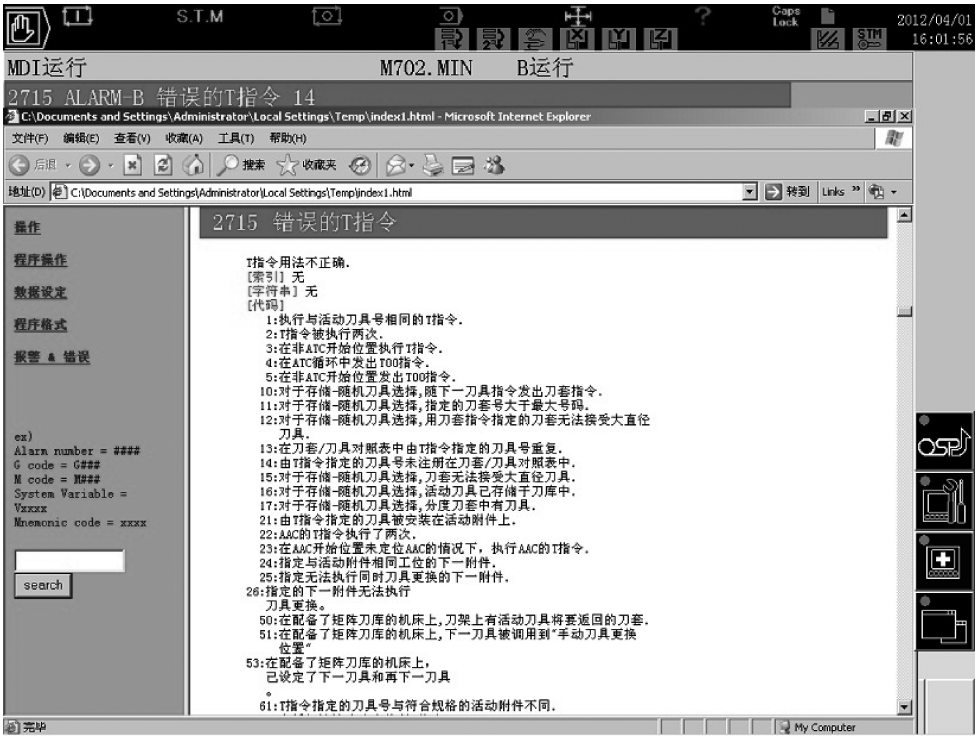


图 2-3-6　帮助信息

图 2-3-7　专用诊断画面

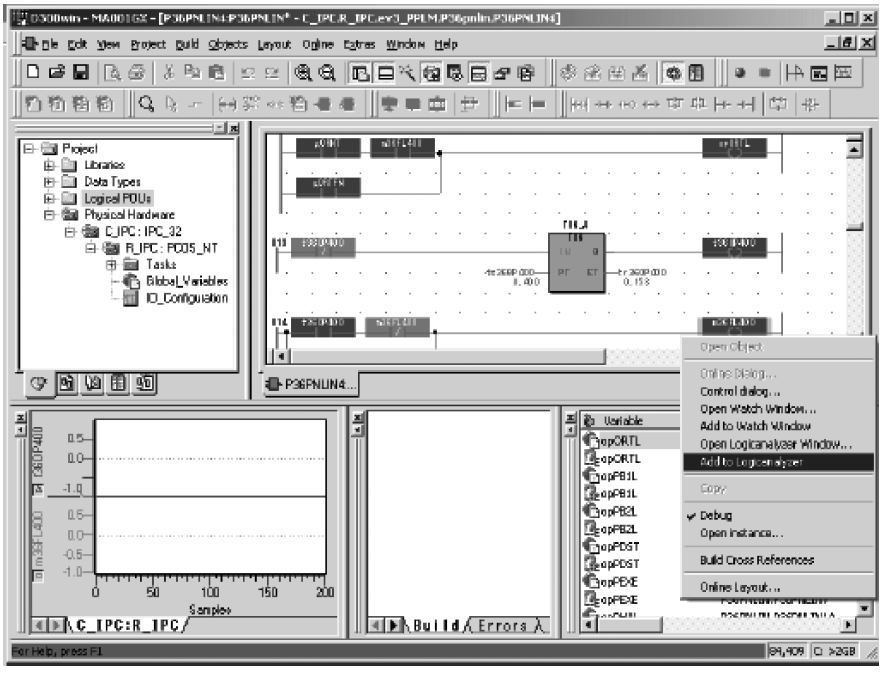


图 2-3-8　PLC 诊断画面

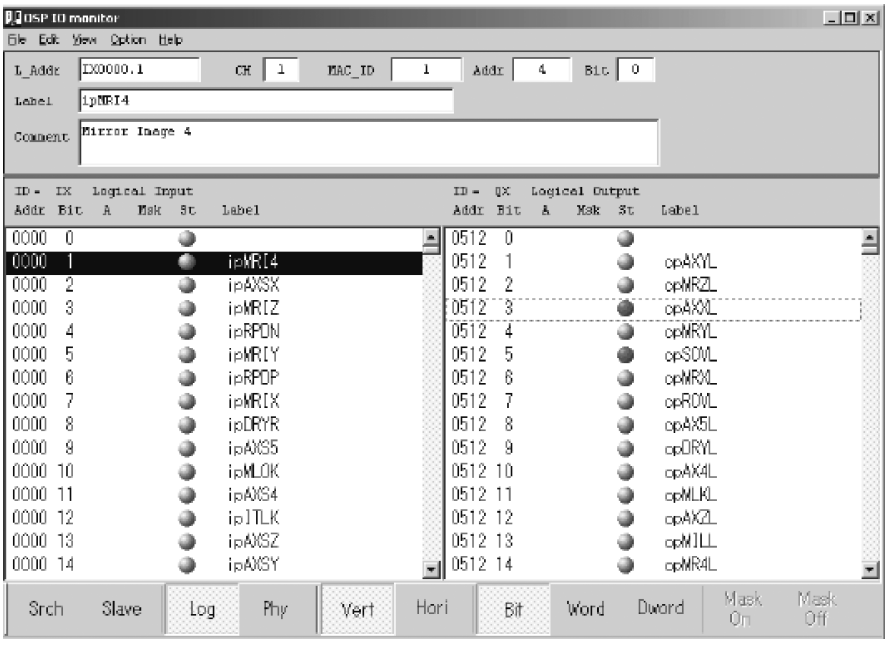


图 2-3-9　I/O 诊断画面

第二节　开环、半闭环与闭环控制系统

按伺服系统的控制方式，伺服的控制回路可以划分为开环和闭环控制，闭环控制回路又可以分为半闭环和全闭环控制回路。

一、开环控制系统

开环控制系统（Open-loop Control System）通常由控制器与被控制对象组成（控制器同时具有功率放大器的功能），系统的控制输入不受输出影响，也可称之为无反馈控制系统，控制方式如图 2-3-10所示。

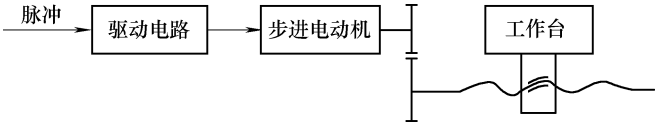


图 2-3-10　开环控制回路图

在开环控制中，伺服对进给轴和主轴电动机没有位置反馈，也不进行误差补偿。伺服系统只是根据 NC 的指令驱动电动机执行动作，在动作过程中不跟踪、不修正，因此，开环控制的结构简单，造价低廉，被广泛用于经济型数控系统中。其缺点是开环控制回路的机床加工精度比较低。

开环控制的数控机床驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机，数控系统每发出一个进给指令，经伺服驱动电路功率放大后，驱动步进电动机旋转一个角度，再经过齿轮减速装置带动丝杠旋转，通过丝杠螺母机构转换为移动部件的直线位移。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率与脉冲数所决定的。此类数控机床的信息流是单向的，即进给脉冲发出去后，实际移动位置就不再反馈回来，所以称为开环控制数控机床。

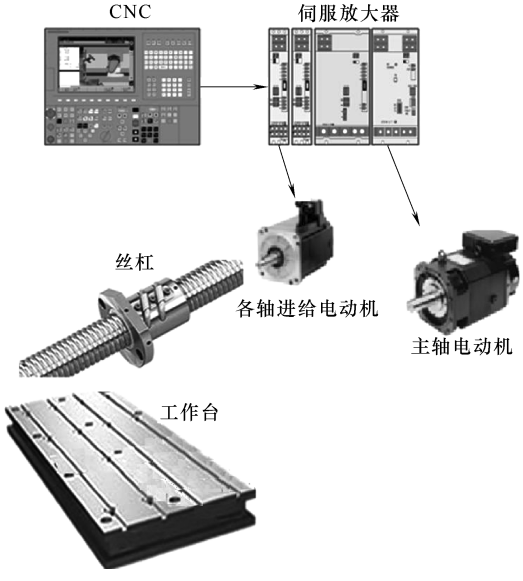


图 2-3-11　开环控制系统示意图

如简易线切割机床、物流输送线、电梯的开环拖动系统等，均为开环控制系统，开环控制系统示意图如图 2-3-11 所示。

二、半闭环控制系统

半闭环控制系统（Semi-closed loop Control System）的位置检测器安装在伺服电动

机的轴上，通过角位移的测量间接计算出机床工作台实际运动位置，并将其与 CNC 系统中原指令位置进行比较，用比较后的差值控制，使工作台补充位移直至差值消除为止。其控制方式如图 2-3-12 所示。由于半闭环回路内不包括丝杠螺母及机床工作台这些大惯性环节，由这些环节造成的误差也不能由环路矫正，所以其控制精度不如闭环控制系统。

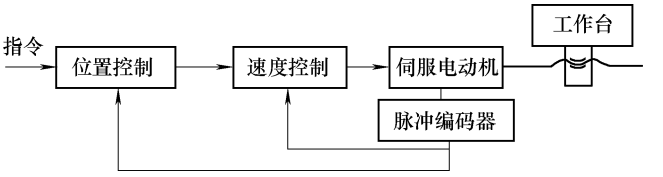


图 2-3-12　半闭环控制回路图

图 2-3-13 所示为半闭环控制系统示意图，安装在电动机轴上的角位移检测装置，能够将电动机的旋转角度反馈到系统中。半闭环系统具有位置反馈和校准控制，可以将机床进给传动中的大部分误差进行补偿。因此，提高了数控机床的运动精度和定位精度。

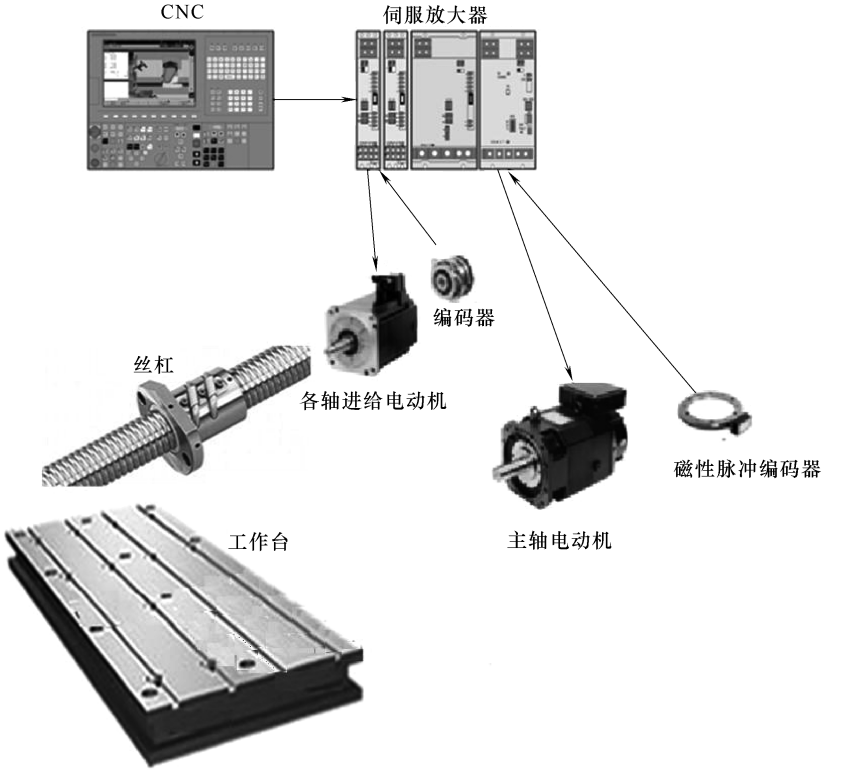


图 2-3-13　半闭环控制系统示意图

半闭环伺服系统所能达到的精度、速度和动态特性优于开环伺服系统，其复杂性和成本低于全闭环伺服系统；半闭环数控机床调试维修比较容易，可以获得比较稳定的控制特性，通过补偿可达到较高的运动精度和定位精度，因此在中小型数控机床中得到了广泛应用。

三、全闭环控制系统

全闭环控制系统（Closed-loop Control System）的位置检测装置安装在机床工作台上，用以检测机床工作台的实际运行位置（直线位移），并将其与 CNC 装置计算出的指令位置（或位移）相比较，用差值进行控制，其控制框图如图 2-3-14 所示。这类控制方式的位置控制精度很高，但由于它将丝杠螺母及机床工作台这些大惯性环节放在闭环内，调试时，其系统稳定状态很难达到。

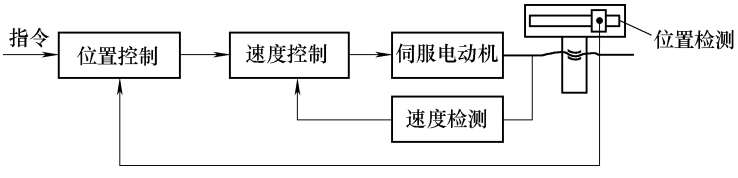


图 2-3-14　全闭环控制回路图

如图 2-3-15 所示，全闭环控制系统是在工作台移动面和机床导轨之间安装了光栅尺，工作台的移动位置直接被反馈到了伺服驱动放大器，真实地将工作台的位置通知伺服放大器，伺服放大器可以更加精确地对工作台的位置进行控制。这样的技术甚至

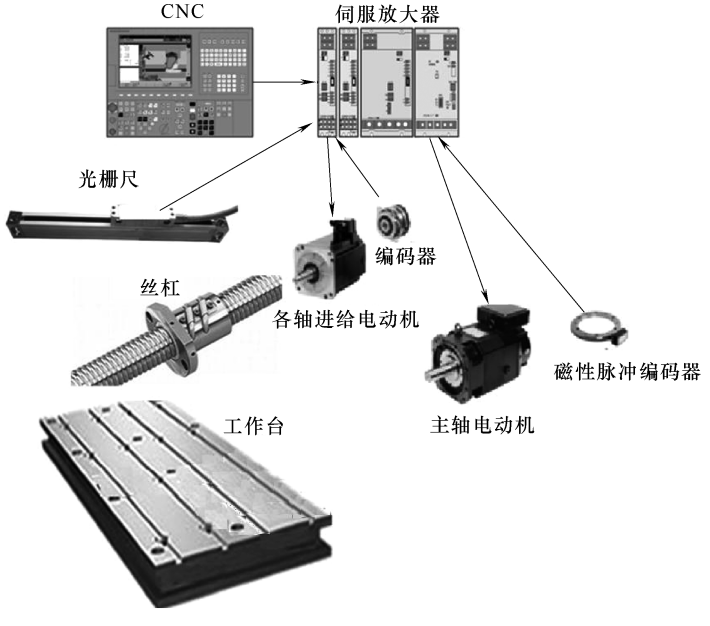


图 2-3-15　全闭环控制系统示意图

可以将机床的精度提高到纳米级。

总结：全闭环数控系统有位置反馈装置（光栅尺），可以把数控机床工作台移动部位的移动量直接反馈到数控装置中，从而使加工精度提高。由于造价高，一般用于高精密机床，比如坐标镗等。而开环数控系统是没有反馈装置的，主要是靠传动部位的传动精度来确定加工精度，加工精度较低，造价低廉，主要用于经济型数控机床和对精度要求不高的数控设备。而半闭环系统，位于闭环与开环之间，调试简单，成本相对较低，同时也有较高的精度，多用于加工中心和数控车床。

第三节　参数的种类和作用

一、参数的含义

通过设定数控系统的各种参数，完成数控系统与机床结构、机床功能之间的匹配。数控系统通过参数可以知道机床的一些特定数据，识别机床上不同的部件，还可判断如何执行用户编写的指令。

数控系统参数是可以根据设计和使用要求进行变更的。数控机床操作手册中说明参数内容时，都会明确告诉操作者某参数的详细作用，操作者根据自己的需要进行设定。但需要注意的是，要使数控系统正确运行，必须正确设定各种参数，否则可能造成严重后果。

二、参数的分类

由于不同的数控系统厂家具有自己独有的技术，同时又由于国家、习惯的不同，对参数的分类也不尽相同。例如：FANUC 系统是根据数据类型进行分类的，分为状态型参数（位型）、实际值参数（字节型、字型、双字型）、比率型参数；西门子数控系统则是按照使用目的不同，把参数分为通用机床数据、专用机床数据、控制和驱动机床单元数据设定数据、显示机床数据；而大限数控系统为了方便用户的使用，将参数分类为机床系统参数、一般参数、NC 任选参数、机床用户参数、刀具参数、工件原点参数。

下面按照适用对象不同，将参数分成三个级别，即数控厂家参数、机床厂家参数、最终用户参数。

三、参数的作用

1. 数控厂家参数

数控厂家参数是指系统供应商在系统出厂前已经设定完的参数。该参数只有系统厂家明白其含义和使用方法，属于保密级参数。而且，在系统供应商提供的公开资料中均不作介绍。对于这一类参数，本书不作说明。

2. 机床厂家参数

机床厂家参数是数控机床厂家生产、安装、调试过程中用于设定、匹配机床的数

据。其包括：各机械轴机械原点设定、螺距误差补偿参数、刀库的动作参数、托盘交换站的动作参数、第四轴的设定参数等。

3. 最终用户参数

最终用户参数是机床的使用者根据加工或者操作的需要进行设定的参数。

该类参数种类繁多，可以根据数据使用的范围分为工件原点数据参数、刀具数据参数、变量类参数、其他设定型数据参数。

前三类参数主要用于零件在加工过程中调用的数据，这类数据使工件的数控程序编制更加简单和方便。工件原点数据参数表示参照机床坐标系原点的工件坐标系的原点。在编制工件数控加工程序时，指定工件坐标系原点和刀具数据参数。而这两类参数，操作者在加工现场可以进行设定。变量类参数又可以分为系统变量及用户变量。系统变量是系统内部变量。对于某些系统变量，编程者在编写程序时只能读取而不能进行写入数据；用户变量是完全可以读写的变量。

其他设定型数据参数主要用于设定机床的运转、操作、显示、数据传输及某些特殊功能。这一类参数可以分为两种。一种是由机床厂家编写在机床的 PLC 内，操作者对这些参数进行变更，可以实现某些特殊的功能。如夹具的互锁和到位确认、手动进给速度、报警指示灯显示及辅助动作等功能。还有一类是由数控系统厂家提前预留在数控系统内可设定的参数。操作者可以通过设定这些参数提高操作和加工的效率。比如：单位参数、固定循环参数、显示画面的参数和数据传输参数等。

四、各数控系统的参数说明

1. 大隈数控系统 OSP-P200M-R

（1）机床厂家参数的设定

1）首先将数控机床的运行方式转到调整模式，操作如下：

在 < MDI > 手动输入模式下，输入 CHGCOND。然后选择“调整模式”，断电后重新加电。加电后，屏幕画面顶部有“调整”两个字在闪烁，说明模式切换成功。

2）将参数画面全部打开。

① 按下 < 参数模式 > 键，切换到参数设定模式。

② 按 < F8 > “画面切换”、按 < ▶ > “扩展”。

③ 按 < F1 > “菜单变更”，将光标移到“全部显示”选项；再按 < F1 > 键“复选标记”。

④ 按 < F7 > “OK”，显示“参数设定”画面，如图 2-3-16 所示。

⑤ 按 < F8 > “关闭”将“画面切换”画面关闭，进入“参数设定”画面。

3）根据需要选取必要的参数进行设置。例如机械轴原点的设定：按 < F8 > “画面切换”，将光标移到“系统参数”选项，再按 < F8 > “关闭”，弹出“系统参数”画面。

将光标移到 *X*、*Y* 轴的各个“原点（机械）”选项，根据需要进行设定后，按 < 写入/执行 > 键，各轴原点设定完毕。

图 2-3-16　“参数设定”画面

4）机床厂家参数清单。表 2-3-1 清单内的参数，可按照 1）的方法进行设定。

表 2-3-1　大隈机床厂家参数表

参数索引	参数名称	参数说明
系统参数	P 行程极限	设定机床各轴的正向行程极限。设定范围 -99999.999 ~ +99999.999
	N 行程极限	设定机床各轴的负向行程极限。设定范围 -99999.999 ~ +99999.999
	螺距误差补偿量	设定各 NC 轴滚珠丝杠螺距误差的补偿范围。在机床坐标系上设定，采用正和负两方向确定该范围界限。设定范围 -99999.999 ~ +99999.999
	原点（机床）	设定机床各 NC 轴原点偏置数据，确定机床坐标系各轴的机床原点
	螺距补偿间隔	设定机床各个轴螺距误差补偿点之间的距离。单位是 1/1000mm
	螺距点数	为各个轴设定螺距误差补偿的各点总数
原始位置	原始位置 1	设定换刀点的位置
	原始位置 1	设定 APC 交换的位置

（续）

参数索引	参数名称	参数说明
原始位置移动顺序	原始位置1	各个轴在换刀时的移动顺序。设定范围0～3。设定为0时，不动作
	原始位置3、4	各个轴在APC交换时的移动顺序。设定范围0～3。设定为0时，不动作
	反向间隙	设定各轴反向间隙补偿值
机械轴	原点	设定机械轴的原点。TS轴为机械手，MA轴为刀库轴，PA轴为托盘交换叉子的原点
	反向间隙	设定机械轴的反向间隙。TS轴为机械手，MA轴为刀库轴，PA轴为托盘交换叉子的原点
	原点	设定APC交换站原点

设定完系统参数后，需要将机床运转模式调整为“正常模式”。

5）“正常模式”的设定方法。在<MDI>手动输入模式下，输入CHGCOND。然后选择“正常模式”，断电后重新加电。加电后，屏幕画面顶部没有“调整”两个字，说明模式切换成功。

（2）最终用户参数的设定

1）工件原点数据参数。

① 工件坐标系的原点表示参照机床坐标系的工件坐标系的原点。对于大隈数控系统标准规格，可设定20组工件坐标系。如果选择特殊配置，可扩展至50、100、200或400组。

② 设定步骤。首先，通过按下<原点设定>模式选择键 ，显示“原点设定”画面，如图2-3-17所示。

然后，利用<F1>“设定”、<F2>“加算”、<F3>“运算”键输入原点偏置数据。

最后，按下<写入/执行>键 将结果输入到系统中。

2）刀具数据参数。

① 根据刀具类型，可用刀具数据参数补偿功能补偿刀尖位置差。按照标准，设定刀具长度补偿数据和刀具半径补偿数据各100组。这些组数可扩展至200、300或999组。

② 设定步骤。

首先，按下<刀具数据设定>模式选择键 ，显示“刀具长补偿/刀具径补偿”画面，如图2-3-18所示。

然后，利用<F1>“设定”、<F2>“加算”、<F3>“运算”键输入刀具补偿值。

图 2-3-17　“原点设定”画面

图 2-3-18　“刀具长补偿/刀具径补偿”画面

最后，按下 <写入/执行> 键将结果输入到系统中。同时在“刀具数据设定”参数画面内，也可以设定刀套编号和刀具编号的对应关系，如图 2-3-19 所示。

3）变量类参数。

图 2-3-19 “刀套 NO./刀具 NO. 对应表（随机存储）”画面

① 公共变量。大限数控系统提供公共变量（用户变量），标准配置是 200 个，从 VC1 到 VC200。该变量可扩展至 1000 个。该变量可以由用户任意使用，和数控系统没有关系。“公共变量”画面如图 2-3-20 所示。

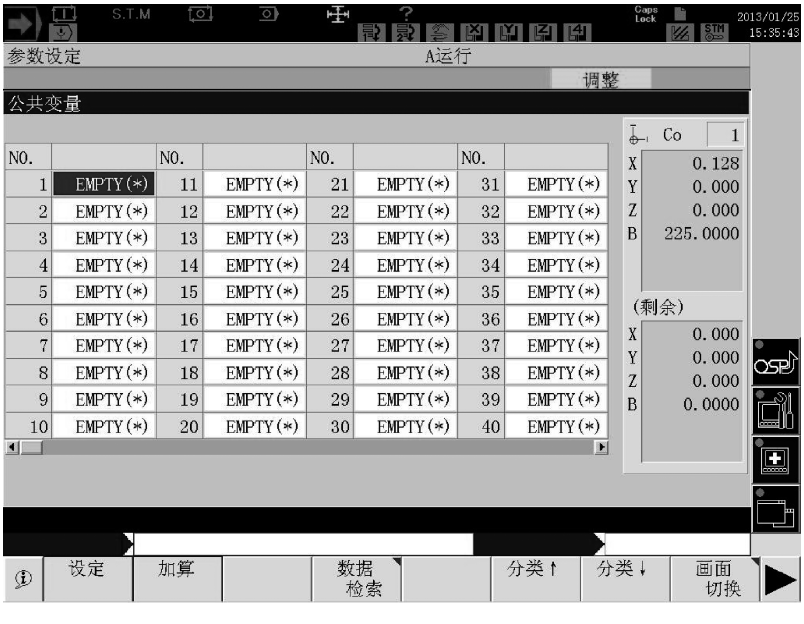


图 2-3-20 “公共变量”画面

② 系统变量。系统变量是指和系统的控制有关的变量。有一些变量只是可读的，有一些变量在可读的同时还可以写入数据。这些变量的使用要严格按照数控厂家的要求进行。系统变量表见表2-3-2。

表2-3-2　系统变量表

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm转换
原点偏置数据	VZOF＊[表达式]	0～±99999.999	工件坐标系编号	读取/写入	自动转换
刀具长度补偿数据	VTOFH[表达式]	0～±999.999	刀具长度补偿编号	读取/写入	自动转换
刀具直径补偿数据	VTOFD[表达式]	0～±999.999	刀具半径补偿号	读取/写入	自动转换
行程终端值（正向）（用户参数）	VPSL＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
行程终端值（负向）（用户参数）	VNSL＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
反向间隙补偿数据	VBLC＊	0～1.000		读取/写入	自动转换
到位宽度	VINP＊	0～1.000		读取/写入	自动转换
原始位置的到位宽度	VHPI＊	0～1.000		读取/写入	自动转换
机床坐标系零点	VMOF＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
可编程行程终端（正向）（用户参数）	VPPL＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
可编程行程终端（负向）（用户参数）	VNPL＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
原始位置的数据	VHPP＊[表达式]	0～±99999.999	1～32	读取/写入	自动转换
传感器触头数据	VSAP＊	0～±99999.999		读取/写入	自动转换
用于通信的设备	VNCOM[表达式]	8位二进制（一个字节）	1～4	读取/写入	不变
计算值	VRCO＊			只读	自动转换
当前位置数据	VAPA＊			只读	自动转换
工作坐标系编号	VACOD			只读	不变
当前刀具编号	VATOL			只读	不变
下一个刀具编号	VNTOL			只读	不变

（续）

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm 转换
坐标系编号，刀具数据组数（NC 标准代码 2）	VSPCO			只读	不变
子程序标准代码（NC 标准代码编号 24）	VSPSB			只读	不变
机械锁定	VMLOK			只读	不变
打印机控制	VPCNT	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
自动标准判断结果 1	VOK1	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
自动标准判断结果 2	VOK2	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
测量数字	VNUM	0 ~ 9999		读取/写入	不变
打印机控制	VINTG	0 ~ ±99999.999		读取/写入	不变
打印机控制	VPRT	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
当前刀具编号	VTLCN	0 ~ 65535		读取/写入	不变
下一个刀具编号	VTLNN	0 ~ 65535		读取/写入	不变
刀具长度/刀具破损检测选择标志	VFST	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
进给速度夹紧值（NC 任选参数（长字）标编号 10）	VFDMX	0 ~ 20000		只读	不变
图表颜色指定	VGCLR	0 ~ 9		读取/写入	不变
程序单元系统	VINCH	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
顺序返回标志	VRSTT	8 位二进制（一个字节）		只读	不变
时间表（跑表）	VDTIM［a，b］		a：1 ~ 5 b：1 ~ 2	只读	不变

（续）

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm 转换
工件计数器	VWRK［a，b］		a：1～4 b：1～2	只读	不变
同步攻螺纹转矩监测参数编号	VTMNO	1～5		读取/写入	不变
同步攻螺纹转矩监测参数	VTMD［表达式］		1～5	只读	不变
主轴过载监测参数编号	VSLNO	1～5		读取/写入	不变
主轴倍率监测参数	VSLDT[a，b]		a：1～5	只读	不变 207
			b：1～3	读取/写入	自动转换
F1-位参数设定进给速度	VPF1［表达式］	0～4000.000	1～9	读取/写入	自动转换
F1-位参数设定值	VPF1［表达式］	0～4000.000	1～9	读取/写入	不变
F1-位参数加速/减速数据	VPF1C	0～4000.000		只读	不变
执行的 G 代码	VGCO［表达式］		1～96	只读	不变
执行的 M 代码	VMCO［表达式］		1～64	只读	不变
执行的 S 代码	VSCOD			只读	不变
执行的 F 代码	VFCOD			只读	不变
执行的 D 代码	VDCOD			只读	不变
执行的 H 代码	VHCOD			只读	不变
镜像状态	VMRI			只读	不变
用于时间的分计数器	VPMNT			只读	不变
分计数器	VRMNT			只读	不变
用于日期的时计数器	VPHUR			只读	不变
时计数器	VRHUR			只读	不变
日计数器	VQDAT			只读	不变
手动位移量	VMSF＊			只读	自动转换
ATC 刀具的编号	VSPTN			只读	不变
PPC 参数	VPPCP			只读	不变

（续）

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm 转换
PPC 工作台编号	VPLNO			只读	不变
PPC 参数位数据	VPLDT［表达式］		1～12	只读	不变
横轨自动定位 M 代码	VECWM			只读	不变
当前附加编号	VATNT			只读	不变
刀具管理数据刀具组编号	VTLD1［表达式］	0～255	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据刀具寿命管理代码	VTLD2［表达式］	0～9	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据 OK/NG 标志	VTLD3［表达式］	0～255	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据刀具寿命标志	VTLD4［表达式］	0～255	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据第二刀具偏移编号	VTLD5［表达式］	0～320	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据第三刀具偏移编号	VTLD6［表达式］	0～320	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据设定刀具寿命数据	VTLD7［表达式］	0～32767	刀具管理编号	读取/写入	不变
刀具管理数据刀具寿命计数数据	VTLD8［表达式］	－32768，－32767	刀具管理编号	读取/写入	不变
MOP 刀具编号	VMPT	0～9		读取/写入	不变
MOP 控制 1	VMPC1	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
MOP 控制 2	VMPC2	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
MOP 控制 3	VMPC3	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
MOP 控制 4	VMPC4	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变
MOP 控制 5	VMPC5	8 位二进制（一个字节）		读取/写入	不变

（续）

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm转换
I/O 数据（输入）	VIRD［表达式］		标识符	只读	不变
I/O 数据（输出）	VORD［表达式］		标识符	只读	不变
机床前面的工作台面类型	VPLTK	0：无 1：L（A） 2：R（B）		只读	不变
任选参数位	VOPRB	0～255	1～64	读取/写入	不变
程序分支 1	VPBR1			只读	不变
程序分支 2	VPBR2			只读	不变
日期，时间	VTIME［表达式］		1～6	只读	不变
刀具号	VPTNO		刀套号	只读	不变
刀套号	VTPNO		刀具号	只读	不变
附加头主轴，过载监视参数	VSLNB	1～5		读取/写入	不变
附加头主轴，过载监视参数	VSLDB［a，b］		a＝1～5 b＝1～3	只读	不变
附加头主轴，同步攻螺纹转矩监视参数编号	VTMNB	1～5		读取/写入	不变
附加头主轴，同步攻螺纹转矩监视参数	VTMDB［表达式］	1～127	1～5	只读	不变
BC 轴附加头垂直角度	VUNVB	0～3600		只读	不变
BC 轴附加头水平角度	VUNVC	0～3600		只读	不变
刀具长度破损量	VTWOH	0～±999.999	刀具长度补偿号	读取/写入	自动转换
刀具半径破损量	VTWOD	0～±999.999	刀具半径补偿号	读取/写入	自动转换
工件坐标系位置 A	VWKA＊			只读	自动转换
工件坐标系位置 B	VWKB＊			只读	自动转换

（续）

系统变量	格　式	设定范围	脚　注	读取/写入	inch/mm 转换
刀具长度形状补偿	VTFGH	0 ~ ±999.999	刀具长度偏置号	读取/写入	自动转换
刀具半径形状补偿量	VTFGD	0 ~ ±999.999	刀具半径补偿号	读取/写入	自动转换

注：“＊”表明一个轴名，如 *X*、*Y* 和 *Z*。

4）其他设定型数据参数。

① 针对机床的用户参数见表 2-3-3（在参数画面内选择）。

表 2-3-3　针对机床的用户参数

参数索引	名　称	说　明
切削液	切削液开关有效	选择时，该功能有效
	吹气喷嘴开关有效	选择时，该功能有效
	吹气喷嘴适配器开关有效	选择时，该功能有效
	油雾开关有效	选择时，该功能有效
	油孔开关有效	选择时，该功能有效
	喷淋清洗开关有效	选择时，该功能有效
	排屑气开关有效	选择时，该功能有效
	切削冲洗开关有效	选择时，该功能有效
	工件清洗枪开关有效	选择时，该功能有效
	中心出水主轴吹气开关有效	选择时，该功能有效
	NC 启动时切屑冲洗 ON	选择时，该功能有效
	通过 M09 不断开切削液	选择时，该功能有效
	通过 M09 不断开吹气（喷嘴）	选择时，该功能有效
	通过 M09 不断开油雾	选择时，该功能有效
	通过 M09 不断开工件喷淋	选择时，该功能有效
	通过 M00/M01 不停止主轴/不断开切削液	选择时，该功能有效
	切削液接通时排屑器运行	选择时，该功能有效
	NC 起动时排屑器运行	选择时，该功能有效
	切削液接通时切屑冲洗 ON	选择时，该功能有效
	切削液门互锁有效	选择时，该功能有效
	油孔门互锁有效	选择时，该功能有效
	喷淋清洗门互锁有效	选择时，该功能有效

（续）

参数索引	名　　称	说　　明
省电/电源断开	省电功能无效	选择时，该功能有效
	执行 M00/M01 期间省电功能无效	选择时，该功能有效
	自动断开电源条件中添加报警发生	选择时，该功能有效
	省电时间	设定机床运行停止到开始省电操作的时间 设定范围 0 ~ 3600s
	自动断开电源时间	设定机床运行停止到自动断开电源的时间 设定范围 0 ~ 3600s
报警指示灯	报警灯有效	选择时，报警后红色指示灯亮
	加工结束灯有效	选择时，加工结束后黄色指示灯亮
	省电功能中报警/加工结束灯不熄灭	选择时，该功能生效
	报警 D 发生时报警灯亮起	选择时，该功能生效
蜂鸣器	加工结束蜂鸣器有效	设定加工结束蜂鸣器有效
	发生报警时蜂鸣器不鸣响	设定发生报警时蜂鸣器不鸣响
	加工结束蜂鸣器鸣响时间	设定加工结束蜂鸣器鸣响的持续时间。设定范围 0 ~ 600s
门互锁	操作门互锁有效时主轴继续旋转	当操作门互锁有效时，选择主轴继续旋转
	操作门互锁主轴允许转速	当操作门打开时，如果主轴是旋转的，则设定最大主轴允许转速。设定范围 50 ~ 800r/min
卡盘、就位确认、尾座	卡盘松开时，禁止切削进给互锁无效	选择时，该互锁无效
	卡盘松开时，禁止主轴旋转互锁无效	选择时，该互锁无效
	卡盘夹紧确认限位开关无效	选择时，卡盘夹紧确认通过时间来设定
	卡盘松开确认限位开关无效	选择时，卡盘放松确认通过时间来设定
	工件夹紧确认时间	设定工件夹紧动作确认时间
	工件松开确认时间	设定工件放松动作确认时间

② 针对数控系统的用户参数见表 2-3-4。

表 2-3-4　针对数控系统的用户参数

索　　引	名　　称	说　　明
指令单位	长度单位制	通过变更可以设定“mm”或者“inch”
	实数指令	输入小数点时，小数点位置的单位是 1mm、1inch、1deg 或 1sec
	长度	设定长度数据的单位为 0.01mm 或 0.001mm

（续）

索　引	名　称	说　明
指令单位	角度	设定角度数据的单位为 -0.001deg 或 0.0001deg
	切削进给速度	设定进给速度数据的单位为 -0.1mm/min 或 1mm/min
	切削进给速度	设定进给速度数据的单位为 -0.001mm/rev 或 0.01mm/rev
	暂停时间	设定时间数据单位为 -0.1sec、0.01sec 或 0.001sec
单方向定位	G60 超程量	当在单方向定位模式中执行定位时，要设定轴超过目标点的距离。设定范围 0～30.000
	定位方向	执行定位指令，在该轴定位到目标点之前，该轴超过目标点已设定距离。对于各个轴，可设定轴定位到目标点的移动方向。如果设定为“-”（负向），例如，在负向上进行定位不会引起超程的问题，而该轴直接定位到目标点。当在同样的设定中执行在“+”（正）方向移动轴的定位指令时，这会使轴超过目标点，因此，要在负向进行定位
固定循环	G73 循环（高速深孔）的回退量，或 G83 循环（深孔）的 I、J 指令时的回退量	对深孔进行加工时，分多次加工。每一次退回时的量，下次进入时的深度将加上退回量
	G76/G87（精/反镗）的定向停止前的回退量	精镗/反镗时，镗刀定向提刀前移动的距离
	G76、G87 中的位移方向和轴	设定 G76 和 G87 循环的位移方向和轴
	G73、G83 中 *Z* 轴的返回动作	把 G73/G83 固定循环的 *Z* 轴返回模式从 G00 转变到 G01
	Z 轴返回时的 G01 进给速度	当在固定循环中，把快速进给转变到切削进给时，要设定进给速度
NC 复位和电源接通时的自动设定	电源断开前选择的程序	当 NC 装置随着接通电源完成起动之后进入自动操作模式时，自动选择断电前的程序
	被自动设定的 G 代码插补	当在 G00 和 G01 之间接通电源时，选择对插补法自动设定的 G 代码
	平面	当接通电源时，选择对指定平面自动设定的 G 代码（G17、G18 和 G19）

（续）

索　引	名　称	说　明
NC 复位和电源接通时的自动设定	刀具长补偿	当接通电源时，选择对刀具长度补偿自动设定的 G 代码（G53 和 G56）
	绝对/增量	当接通电源时，选择对坐标数值指令自动设定的 G 代码［G90（绝对指令）和 G91（增量指令）］
	每分钟进给/每转进给	当接通电源时，选择对进给速度单位自动设定的 G 代码［G94（mm/min）和 95（mm/rev）］
RS232C 数据传输参数	B1. 波特率（BPS）	对于通过 RS232C 接口传输的数据，设定波特率。设定范围：110 ~ 19200bps
	B2. RS232C 字符长度	由 RS232C 接口处理的字符长度（数据长度）被固定到 8 位
	B3. RS232C 奇偶校验位	设定范围：未指定/偶数/奇数
	B4. RS232C 停止位	设定范围：2/1
	B5. 准备结束等待时间（忙时）	如果在设定期间，连接的设备未准备就绪，则会出现错误
	B6. 流量控制	设定范围：DC CODE/RS/CS
	B7. 传送结束后的 RS 信号 ON 时间（ON 时 =0）	延时计时器用于断开由 RS232C 或［参数输入/输出］指令起动的数据通信正常结束或异常结束的 RS 信号
	B8. RS 信号 OFF 时的 OFF 时间	设定在由 RS232C 或数据输入/输出指令起动的数据通信正常结束或异常结束时断开 RS 信号的时间
	B9. 穿孔时的 DC2/DC4	在由 RS232C 或数据指令起动的输出操作期间，利用 DC2 或 DC4 通信控制代码禁止数据传送
	B10. 读入/校验结束时 DC3	在 DC 代码控制下进行通信过程中，在由 RS232C 或［参数输入/输出］指令起动的数据输入及校验结束时输入空数据后，则不发送 DC3 代码

2. FANUC 0i MD 参数说明

（1）FANUC 0i MD 系统常用参数的设定方法　参数的设定需要按照以下步骤进行：

1）在参数的“设定”画面中，打开参数写保护开关。

2）按下 < SYSTEM > 功能键后，再选择“ + 输入”按钮直到显示“参数”画面。按下 < 设定 > 键，出现参数设定支援画面。

3）进入参数设定支援画面后，按下 < 操作 > 键，将光标移到需要设定的数据处，再按下 < 选择 > 键，出现相应参数的设定画面。在该画面中可对需要修改的参数进行设定。

（2）FANUC 0i MD 系统参数表

1）机床厂家参数见表 2-3-5。

表 2-3-5　机床厂家参数表

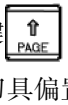
参数号	参 数 说 明	设　定　值	含　　义
1006#0	直线轴或回转轴	0	直线轴
		1	回转轴
1006#5	手动返回参考点的方向	0	正方向
		1	负方向
1020	各轴的程序名称	85	*U* 轴
		86	*V* 轴
		87	*W* 轴
		5	*X* 轴的平行轴
		6	*Y* 轴的平行轴
		7	*Z* 轴的平行轴
1240	第一参考点的机械坐标		
1320	存储行程检测 1 的正向边界坐标值		根据机床设定
1321	存储行程检测 1 的负向边界坐标值		根据机床设定
1410	空运行速度		设定举例：1000
1420	快速移动速度		设定举例：8000
1421	快速移动速度倍率 F0 速度		设定举例：1000
1423	JOG 进给速度		设定举例：1000
1424	手动快速移动速度		设定举例：5000
1425	返回参考点时的 FL 速度		150
1428	返回参考点速度		设定举例：5000
1430	最大切削进给速度		设定举例：3000
1825	伺服位置环增益		设定举例：5000
1826	到位宽度		设定举例：10
3716#0	主轴电动机种类	0	模拟电动机
		1	串行主轴
3620	每个轴的参考点的螺距误差补偿点号	0 ~ 1023	
3621	每个轴的最靠近负侧的螺距误差补偿点号	0 ~ 1023	
3622	每个轴的最靠近正侧的螺距误差补偿点号	0 ~ 1023	
3623	每个轴的螺距误差补偿倍率	0 ~ 100	
3624	每个轴的螺距误差补偿点间隔	取决于该轴的设定单位	
3625	旋转轴型螺距误差补偿的每转动一周的移动量	取决于该轴的设定单位	

2）最终用户参数见表2-3-6。

表2-3-6　最终用户参数表

参数号	参数说明	设定值	含义
1001#0	直线轴最小移动单位	0	米制
		1	英制
1013#1	设定单位、最小移动单位	0：IS-B	0.001mm、0.001deg或0.0001inch
		1：IS-C	0.0001mm、0.0001deg或0.00001inch
3290#0	是否禁止从MDI键入操作刀具的偏差	0	不禁止
		1	禁止
3401#0	在可以使用小数点的地址中省略小数点	0	视为最小设定单位（通常的小数点输入）
		1	将其视为mm，inch，deg，sec的单位（计算型小数点输入）
3402#0	G01通电及清除状态时	0	G00方式（定位）
		1	G01方式（直线）
3402#1	G18通电及清除状态时	0	G17方式（*X*-*Y*平面）
		1	G18方式（*Z*-*X*平面）
3402#3	G91通电时及清除状态时	0	G90方式（绝对指令）
		1	G91方式（增量指令）
5114	高速深孔钻削循环的返回量		设定G73高速深孔钻削循环的返回量
5115	深孔钻削循环的空程量		设定G73深孔钻削的空程量

（3）刀具参数及工件坐标系的设定　按下功能键 ，可以设定刀具参数或者是工件坐标系（G54～G59共6组）。

说明：多次按下功能键 或者翻页键  查找需要设定的画面。

刀具偏置存储器A如图2-3-21所示，刀具偏置存储器C如图2-3-22所示，工件坐标系的设定画面如图2-3-23所示。

（4）FANUC 0i-MD变量　FANUC系统在程序中定义变量时，可以忽略小数点。例如：当#1＝123被定义时，变量#1的实际值为123.000。

未定义的变量：当变量的值未定义时，这样的一个变量被看做“空”变量，变量#0总是“空”变量，是一个只读变量。

根据变量号将变量分为四类，见表2-3-7。

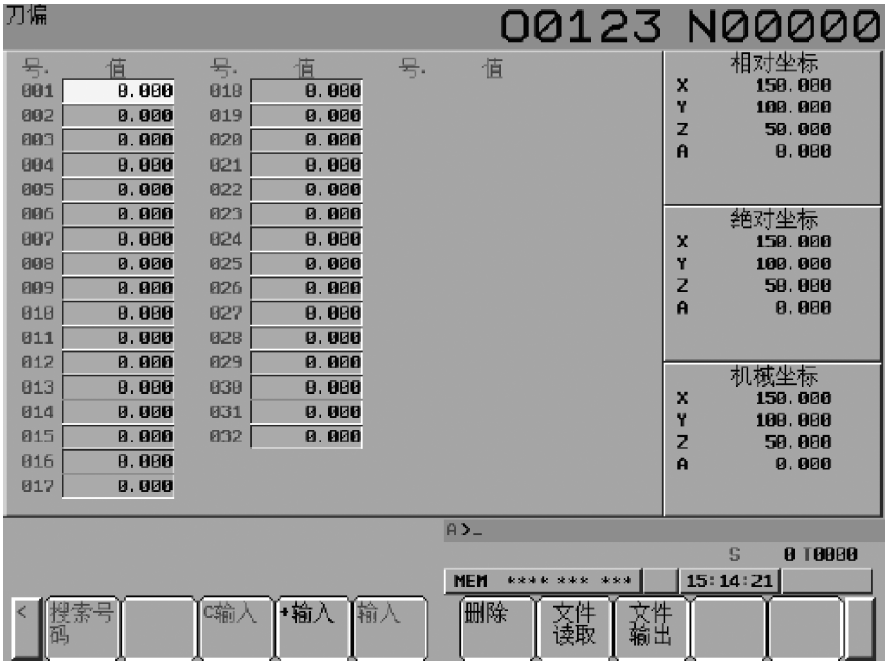


图 2-3-21　刀具偏置存储器 A

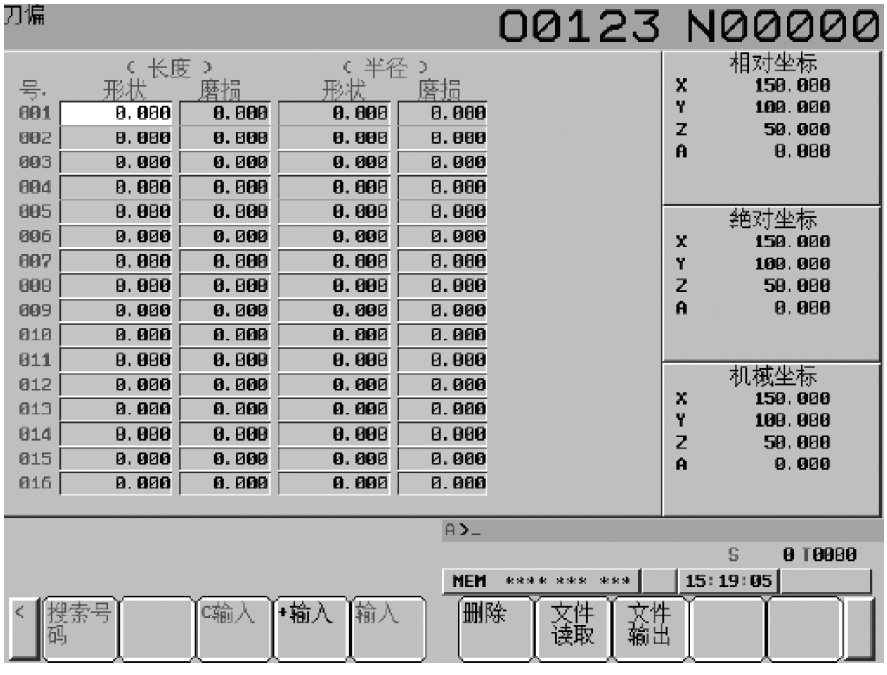


图 2-3-22　刀具偏置存储器 C

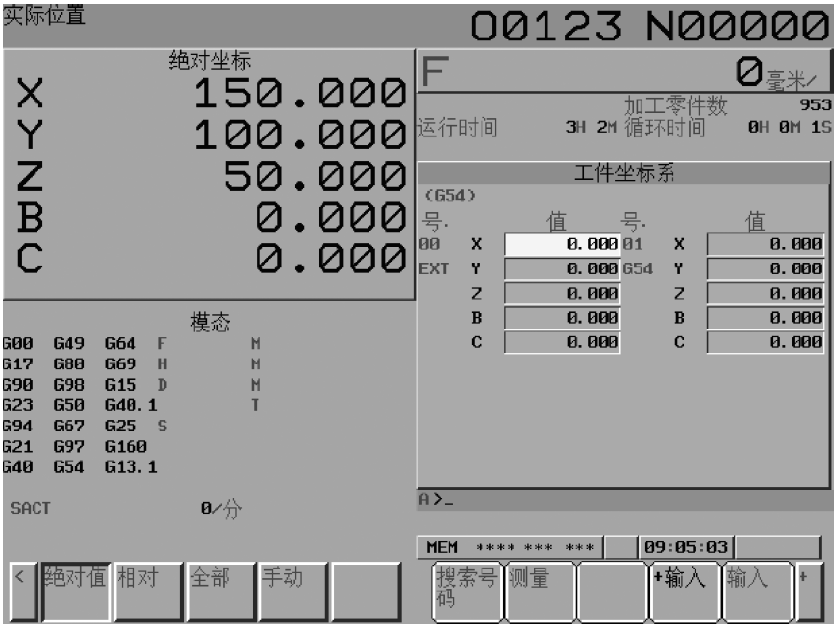


图 2-3-23　工件坐标系的设定画面

表 2-3-7　系统变量表

变　量　号	变 量 类 型	功　　能
#0	“空”	这个变量总是空的，不能赋值
#1 ~ #33	局部变量	局部变量只能在宏中使用，以保持操作的结果，关闭电源时，局部变量被初始化成“空”。宏调用时，自变量分配给局部变量
#100 ~ #149	公共变量	公共变量可在不同的宏程序间共享。关闭电源时变量#100 ~ #149被初始化成“空”，而变量#500 ~ #531 保持数据 公共变量#150 ~ #199 和#532 ~ #999 可以选用，但是会影响程序的存储容量
#150 ~ #199		
#500 ~ #531		
#532 ~ #999		
#1000 及以上	系统变量	系统变量用于读写各种 NC 数据项，如当前位置、刀具补偿值

第四节　几种主流数控系统

目前国际市场上，中高端的数控系统主要有日本 FANUC、SIEMENS 数控系统，其中 FANUC 数控系统占一半左右，其他还有像日本大隈的 OSP 数控系统、日本三菱系统、西班牙发格系统、美国哈斯系统等。在国内市场上，数控系统的主要规模生产企业有 20 多家，以武汉华中数控、广州数控、大连大森、北京凯恩帝等为代表，其中广州数控、华中数控系统以企业发展快、产品价格低廉，得到许多国内机床厂家的认可。

下面分别介绍几种主流数控系统。

一、FANUC 系统

1. FANUC 数控系统

FANUC 系统通常的中文译名为“发那科”。FANUC 系统进入中国市场有非常悠久的历史，有多种型号的产品在使用，使用较为广泛的有 FANUC 0、FANUC16、FANUC18、FANUC21 等系列产品。

2. FANUC 系统特点

FANUC 系统具有高质量、高性能、功能全，可适用于各种机床及生产机械的特点。系统在设计中大量采用了模块化的结构，这种结构易于拆装、各个控制板高度集成，使可靠性有很大的提高，而且便于维修、更换。

FANUC 系统设计了比较健全的自我保护电路。同时，具有很强的抵御恶劣环境影响的能力，可以在较为宽泛的环境中使用，对于电压、温度等外界条件的要求不是特别高，因此适应性很强。

FANUC 系统配置的系统软件具有较强的基本功能和选项功能，可以满足机床厂家和用户的使用要求；另外 PMC 信号和 PMC 功能指令极为丰富，便于机床厂家编制 PMC 控制程序，而且增加了编程的灵活性。

FANUC 系统提供串行 RS232C 接口、以太网接口，能够方便、可靠地完成 PC 和机床之间的数据传输；另外，还提供丰富的维修报警和诊断功能。

FANUC 系统性能稳定，操作界面友好，系统各系列总体结构非常地类似，具有基本统一的操作界面。

3. 使用广泛的 FANUC 0i 数控系统

FANUC 0i 系列数控系统是具有高性价比的产品，备用整体功能软件包，可实现高速度、高精度加工，并具备网络功能。0i-MD 型系统用于加工中心和数控铣床，可以实现四轴四联动；0i-TD 系统用于数控车床，可四轴两联动。FANUC 0i 系统操作面板如图 2-3-24 所示。

图 2-3-24　FANUC 0i NC 面板

（1）0i-MD 型数控系统的硬件回路构成 FANUC 0i-MD 系统如图 2-3-25 所示。

（2）0i-MD 系统的特点　该系统结构紧凑，连接简单，使用了高速串行伺服总线（用光缆连接）和串行 I/O 数据口；因具备以太网口，故而使用该系统的机床可以单机运行，也可以方便地入网用于柔性加工生产线。FANUC 0i-MD 系统的特点如图 2-3-26 所示。

二、SIEMENS 系统

1. SIEMENS 系统产品系列

SIEMENS 数控系统是西门子公司在工业领域的自动化品牌产品，主要有 SINU-

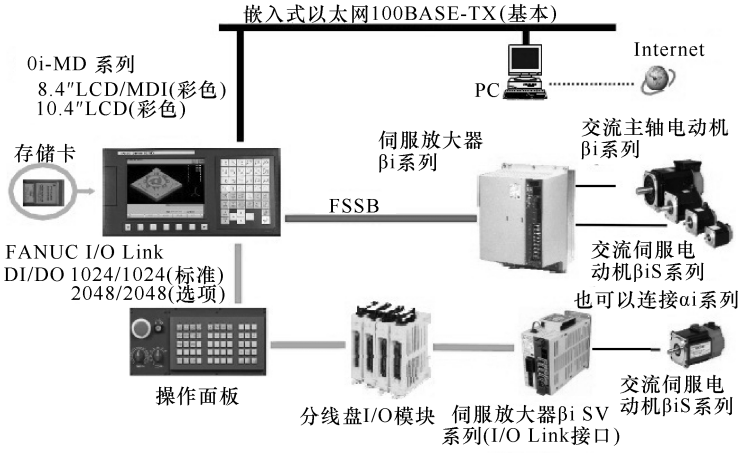


图 2-3-25　FANUC 0i-MD 系统连接图

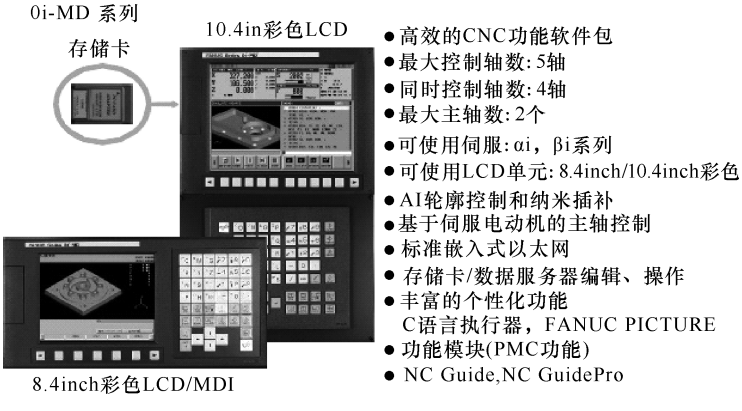


图 2-3-26　FANUC 0i-MD 的特点

MERIK 840 系列、SINUMERIK 810 系列、SINUMERIK 802 系列及 SINUMERIK 828 系列等数控系统，其中 SINUMERIK 828 系列是西门子公司最近几年才投放国内市场的，而 SINUMERIK 828D 功能介于 SINUMERIK 840D 和 SINUMERIK 802D sl 之间，具有优异的性价比。

2. SINUMERIK 828D 系统

西门子 SINUMERIK 828D 系统连接图如图 2-3-27 所示。

1）SINUMERIK 828D 系统集 CNC、PLC、操作界面以及轴控制功能于一体，支持车、铣两种工艺应用。外形简洁紧凑，却拥有卓越的性能。基于 80 位浮点数的纳米计算精度充分保证了控制的精确性。如果要在工件倾斜平面上进行铣削加工，SINUMERIK 828D 可以自由地将坐标系转换到加工平面，既方便了编程，也提高了程序的准确性。针对模具加工的 MDynamics 高级铣削工艺解决方案真正实现最佳的表面质量和高速、高精加工的和谐统一，能够很好地满足高精度模具加工的苛刻要求。

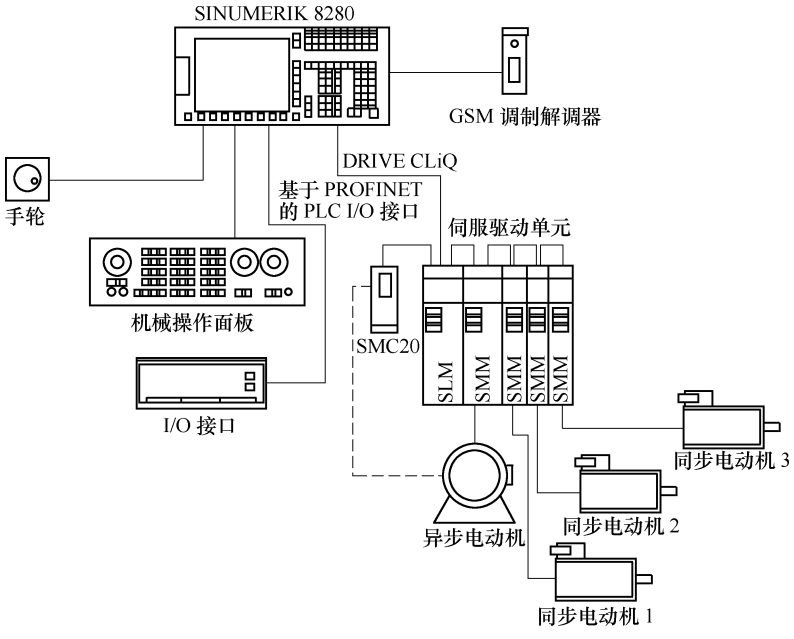


图 2-3-27　西门子 SINUMERIK 828D 系统连接图

2）SINUMERIK 828D 最大的特点就是简单、好用。“简单”体现在它的图形编程和人机界面上，它的图形编程既包括传统的 G 指令，还有现在的指导性编程，用户可以根据指导性编程一步步按自定义的步骤进行，简单、快捷。此外，它还支持多种编程方式，包括灵活的编程向导，高效的“ShopMill/ShopTurn”工步式编程和全套的工艺循环，可以满足从大批量生产到单个工件加工的编程需要，在显著缩短编程时间的同时确保工件精度。

3）SINUMERIK 828D 还采用全新的 HMI 操作界面 SINUMERIK Operate，使用大量动画支持和在线帮助为用户的操作与编程带来极大便利。

4）西门子 SINUMERIK 828D 新增的 Easy Message 短信功能，可以让报警信息和维护信息以手机短信的形式通知服务人员，操作者不在现场，就可以对机床进行远程监控，根据操作者的设定，把需求传给操作者，一个人可以同时管理很多台机床，操作方便，便于操作者的及时响应。

三、大隈系统

1. 日本大隈公司概况

日本大隈是一家具有 110 多年历史的数控机床厂家，从 20 世纪 60 年代开始进行数控系统的研制，现已成为最新一代开放式数控系统的典型代表。

2. OSP-P200A 产品特点

OSP-P200A（全中文界面）控制系统是日本大隈自行研制的，系统不仅先进、稳定可靠，且功能实用、操作方便，完全与机床融为一体。工件坐标系达 100 个，刀具

长度补偿和刀具半径补偿各 300 组，程序存储容量达 2GB，程序运行缓冲达 2MB。

各进给轴电动机采用大隈自主开发绝对位置编码器，断电后仍可记住当前位置而无需回零，大大提高了机床的可靠性，同时降低了因意外造成的故障。系统显示界面为 Windows 系统，采用触摸式显示屏，操作方便。

OSP-P200A 产品是采用设备总线结构将伺服驱动系统和 NC 数控系统紧密结合，数据传输速度快，极大地提高了数控系统的精度。同时，伺服驱动单元采用了一体化设计，单个驱动单元可以驱动主轴外，同时还可以再驱动 4 个伺服电动机。一体化的产品设计，减少了外部配线，提高了运行的稳定性。

大隈新一代数控系统的构成如图 2-3-28 所示。

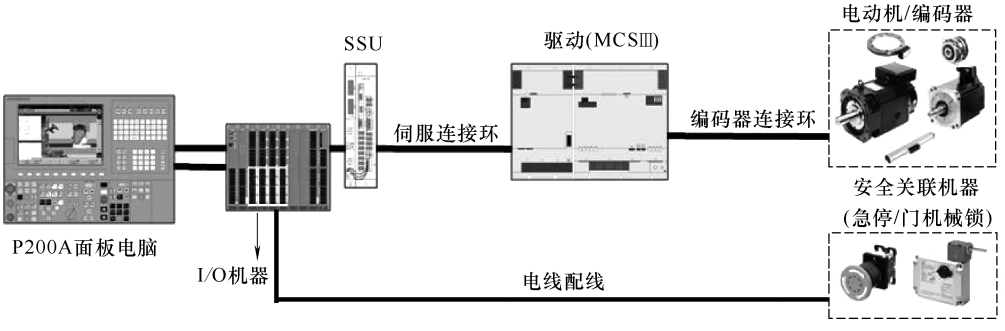


图 2-3-28　大隈 OSP-P200A 系统连接图

大隈系统具有很好的扩展性，极高的可靠性，其特点如图 2-3-29 所示。

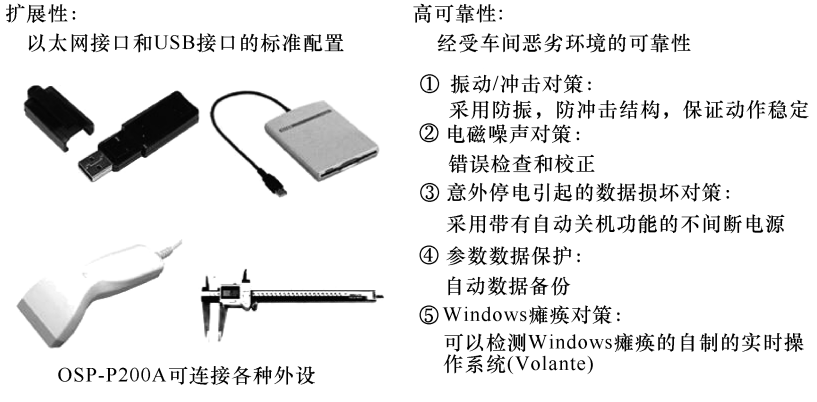


图 2-3-29　大隈系统的特点

四、华中数控系统

1. 华中数控概况

武汉华中数控有限公司成立于 1994 年，通过多年自主研发、推进科研转化，形成了系列化、成套化的中、高档数控系统产品产业化基地。华中数控发展至今具备了较

强的系统配套能力，既能生产如 HNC-8、HNC-210、HNC-21、HNC-18/19 等高档、中档、普及型数控系统，还可以提供全数字交流伺服主轴系统、全数字交流伺服驱动系统等产品，充分满足各类用户的不同需求。

2. 华中数控代表性产品

华中 8 型全数字总线式高档数控系统是其代表性产品，该系列产品采用模块化、开放式体系结构，基于具有自主知识产权的 NCUC 工业现场总线技术。支持总线式全数字伺服驱动单元和绝对值式伺服电动机，支持总线式远程 I/O 单元，集成手持单元接口，采用电子盘程序存储方式，支持 CF 卡、USB、以太网等程序扩展和数据交换功能。HNC-8BM 数控装置采用 10.4 in LED 液晶显示屏，如图 2-3-30 所示，应用于数控铣削中心、车铣复合、多轴、多通道等高档数控机床。

图 2-3-30　HNC-8BM 显示屏

HNC-8BM 数控装置具有以下特点：

1）真彩图形界面设计。

2）支持多轴多通道。

3）支持车铣复合。

4）梯形图在线监控和编辑。

5）线框图的保存（界面任意切换，图形不丢失）。

6）继承了 HNC-21 系列强大的宏程序功能，并且有更进一步的扩展，用户可以使用更多的变量、函数，同时增加了用户宏程序模态调用等一系列高级功能。

7）支持龙门轴同步、动态轴释放/捕获、通道间同步等功能。

8）HNC-8 系列继承了 HNC-21 系列强大的宏程序功能，并且有更进一步的扩展，用户可以使用更多的变量、函数，同时增加了用户宏程序模态调用等一系列高级功能。

9）简化编程功能：镜像、缩放、旋转、直接图样尺寸编程等。

10）功能齐全，可实现各种内置循环。

第五节　数 据 传 输

一、RS232C 接口

如图 2-3-31 所示，用一根 RS232C 电缆，就可以很简单地把机床和计算机进行连接，在计算机和数控机床之间进行系统参数、PMC 参数、螺距补偿参数、加工程序、刀补等数据传输，完成数据备份和数据恢复，以及 DNC 加工和诊断维修。RS232C 接口在数控机床上有 9 针或 25 针串口。

1. DB-25 和 DB-9 型插头座针脚功能

串口各针脚功能见表 2-3-8，DB 针脚排列如图 2-3-32 所示。

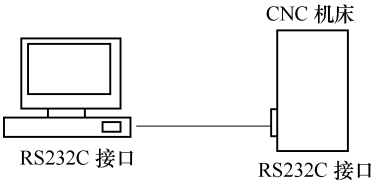


图 2-3-31　RS232C 数据传输简图

表 2-3-8　串口各针脚功能表

DB-9 串行口的针脚功能			DB-25 串行口的针脚功能		
针脚	符号	信号名称	针脚	符号	信号名称
1	DCD	载波检测	8	DCD	载波检测
2	RXD	接收数据	3	RXD	接收数据
3	TXD	发送数据	2	TXD	发送数据
4	DTR	数据终端准备好	20	DTR	数据终端准备好
5	SG	信号地	7	SG	信号地
6	DSR	数据准备好	6	DSR	数据准备好
7	RTS	请求发送	4	RTS	请求发送
8	CTS	清除发送	5	CTS	清除发送
9	RI	振铃指示	22	RI	振铃指示

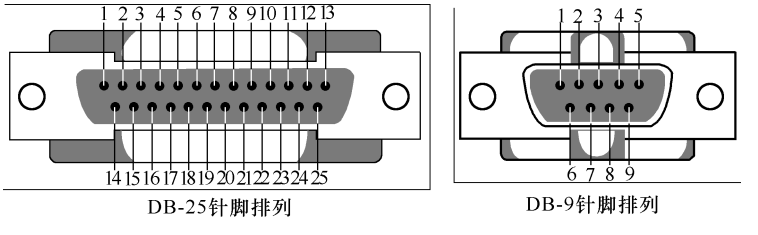


图 2-3-32　DB 针脚排列

2. 不同数控系统数据传输线接线方式

（1）FANUC 0 系统传输线接线方式（图 2-3-33）

（2）SIEMENS 数控系统的传输线接线方式（图 2-3-34）

（3）大限数控系统数据传输线接线方式（图 2-3-35）

（4）华中数控系统的数据传输线接线方式（图 2-3-36）

3. 端口参数和设置

串口通信最重要的参数是波特率、数据位、停止位、奇偶校验和流控制。对于两个进行通信的端口，这些参数必须相同。

（1）波特率　波特率是一个衡量通信速度的参数。它表示每秒钟传送的 bit 的个数。例如 300 波特表示每秒钟发送 300 个 bit。当提到时钟周期时，就是指波特率，例

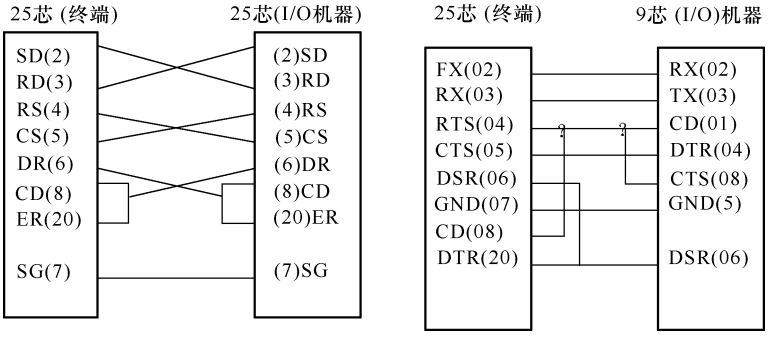


图 2-3-33　FANUC 0 系统传输线接线方式

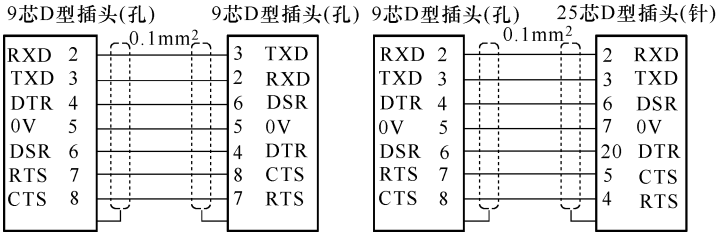


图 2-3-34　SIEMENS 数控系统传输线接线方式

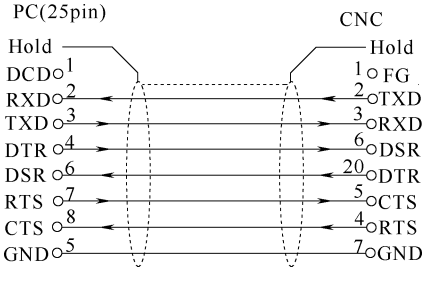


图 2-3-35　大限系统数据传输线接线方式

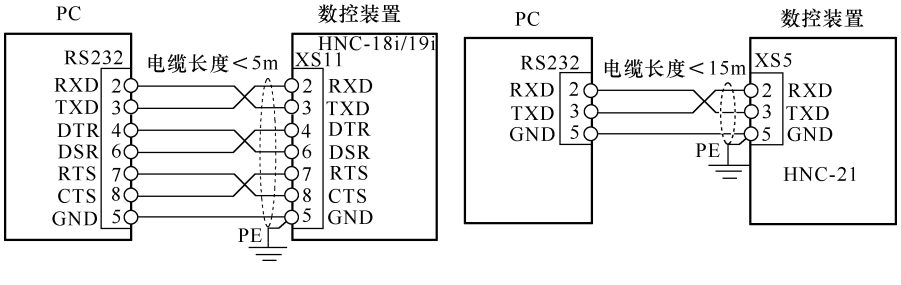


图 2-3-36　华中数控系统数据传输线接线方式

如如果协议需要 4800 波特率，那么时钟是 4800Hz。

（2）数据位　数据位是衡量通信中实际数据位的参数。当计算机发送一个信息包，实际的数据不会是8位的，标准的值是5位、7位和8位。如何设置取决于需传送的信息。比如，标准的ASCII码是0～127（7位），扩展的ASCII码是0～255（8位）。如果数据使用简单的文本（标准ASCII码），那么每个数据报使用7位数据。每个数据报是指一个字节，包括开始/停止位，数据位和奇偶校验位。

（3）停止位　停止位用于表示单个包的最后一位。典型的值为1位，1.5位和2位。由于数据是在传输线上定时的，并且每一个设备有其自己的时钟，很可能在通信中两台设备间出现了小小的不同步。因此，停止位不仅仅是表示传输的结束，并且提供计算机校正时钟同步的机会。

（4）奇偶校验位　奇偶校验是串口通信中的一种简单的检错方式。有四种检错方式：偶、奇、高和低。当然没有校验位也是可以的。

（5）流控制　在进行数据通信的设备之间，以某种协议方式来告诉对方何时开始传送数据，或根据对方的信号来进入数据接收状态以控制数据流的启停，它们的联络过程就叫“握手”或“流控制”，RS232可以用硬件握手或软件握手方式来进行通信。

（6）硬件握手　在软件握手基础上增加RTS/CTS和DTR/DSR一起工作，一个作为输出，另一个作为输入。第一组线是RTS和CTS，当接收方准备好接收数据，它置高RTS线表示它准备好了，如果发送方也就绪，它置高CTS，表示它即将发送数据；另一组线是DTR和DSR。

（7）通信端口的设置　设备双方数据的设置必须相同，否则不能进行正常通信。

4. PC与数控机床相连进行传输数据或DNC操作时的注意事项

1）使用双绞屏蔽电缆制作传输线，长度≤15m。

2）传输线金属屏蔽网应焊接在插头座金属壳上。

3）PC与CNC的连接必须在断电情况下进行。

4）PC与CNC的端口数据的设置必须相同。

5）通信电缆两端须装有光电隔离部件，以分别保护数控系统和外设计算机。

6）计算机与数控机床要有同一接地点，并可靠接地。

7）通电情况下，禁止插拔通信电缆。

8）雷雨季节须注意打雷期间应将通信电缆拔下，避免因雷击而导致接口损坏。

二、数据传输实例：使用西门子的WINPCIN进行数据传输

当前市场上的DNC软件有多种，西门子公司的NC通信软件得到广大使用者的认可。该软件有PCIN和WINPCIN两种版本，PCIN是基于MS-DOS版本下的软件，而WINPCIN是基于Windows操作系统下的软件。这两种软件从使用方便的角度相比，WINPCIN的Windows界面更易于初学者使用。

1. WINPCIN的启动

WINPCIN软件安装完成后双击图标

后启动软件，软件主界面如图2-3-37所示。

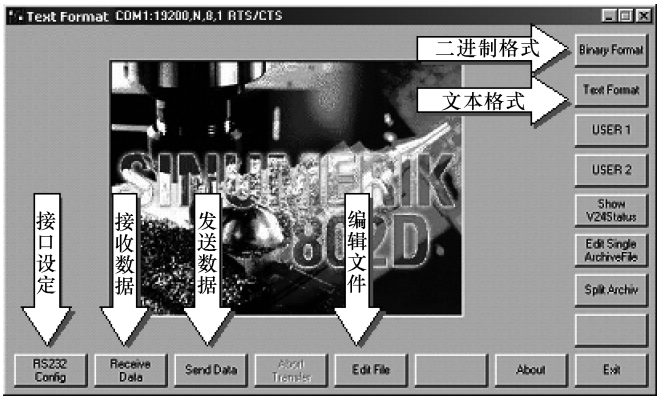


图 2-3-37　WINPCIN 主界面

2. WINPCIN 接口设定

按下“RS232 Config”按钮，进入 WINPCIN 传输参数设定界面，如图 2-3-38 所示。

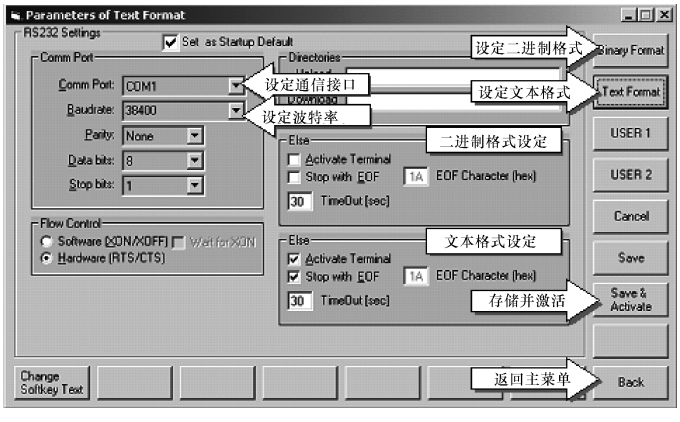


图 2-3-38　WINPCIN 传输参数设定界面

“Comm Port”：通信接口，选择 COM1。

“Baud rate”：波特率，一般选择 9600 或 19200，根据传输数据的可靠性来确定。

“Parity”、“Data bits”和“Stop bits”等信息保持默认设定即可。

选择数据传输的格式有文本和二进制两种，对于零件程序的传输需要选择文本格式“Text Format”。

为了避免每次进入该软件总是要进行参数修改，可用鼠标勾选“Set as Startup Default”选项。

参数设定完毕后，用鼠标左键单击界面右侧的“Save&Activate”按钮保存并激活参数。最后单击“back”按钮回到软件主界面。

3. 机床侧的数据设定

机床侧的数据设定一定要和 WINPCIN 中的参数设定一致，机床侧参数设定请按照

各数控系统的说明书进行。下文以西门子 802D 为例进行说明。

数控机床 802D 系统传输参数的设置可按照以下步骤进行。

1）同时按住键盘 < ALT > 和 < N > 键，弹出图 2-3-39 所示的机床侧数据传输主界面。

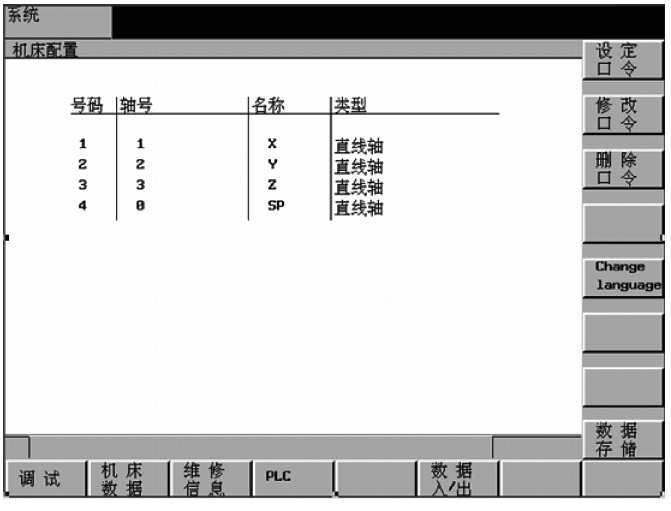


图 2-3-39　机床侧数据传输主界面

2）单击菜单按钮“数据入/出”，弹出图 2-3-40 所示的机床侧数据输入输出界面。

图 2-3-40　机床侧数据输入输出界面

3）单击菜单按钮“RS232 设置”，设置通信接口，如图 2-3-41 所示。

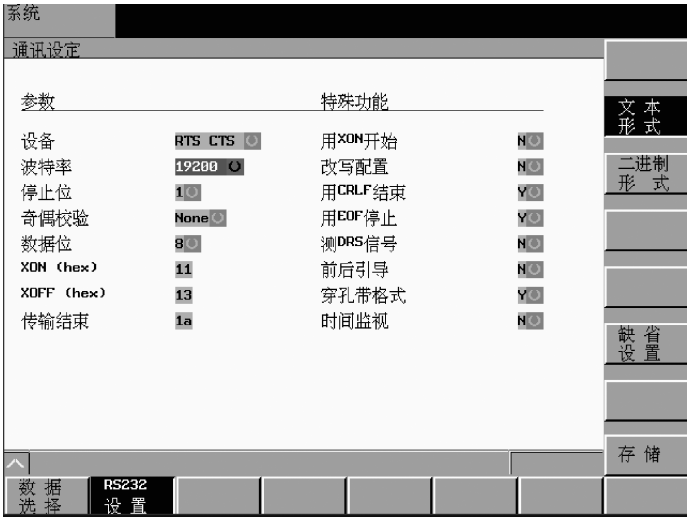


图 2-3-41　机床侧 RS232 设置界面

4）设定传输的波特率，使其同传输软件中的波特率一致（使用机床控制面板上的 SELECT 键切换波特率）。

5）设定文件传输格式为“文本形式”。

6）选择 存储 按钮进行存储。

4. NC 程序的传输

在工作中有许多程序不方便在机床上编制，要将在计算机中编制好的程序发送到机床中，或者将机床中的程序文件下载到计算机中进行备份。发送和接收数据时，应本着数控系统和计算机两侧“先接收数据的一侧应先做好接收准备”的原则，即：数控系统要接收数据时，数控系统侧要先做好接收准备；计算机要接收数据时，计算机先做好接收准备。下面介绍在计算机一侧进行程序的发送与接收的步骤。

（1）计算机向机床发送程序

1）数控机床先做好接收加工文件的准备，按系统面板上的按键 PROGRAM MANAGER，将系统界面切换至如图 2-3-42 所示的界面，再选择 读入 按钮。

2）计算机启动 WINPCIN 软件，并做好传输参数的设置。在计算机中选择需要传输的 NC 程序。

单击数据发送按钮 Send Data，在保存加工文件的路径下选取要传送的加工程序名称，单击“打开”按钮，即可完成文件传送工作。

（2）机床向 PC 传输数据

1）打开 WINPCIN 软件，并单击接收数据按钮 Receive Data。

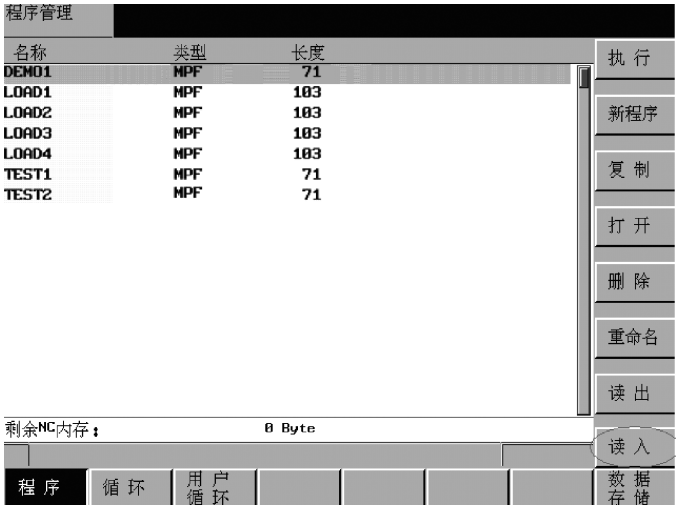


图 2-3-42　机床侧程序读入读出界面

2）此时将弹出一个对话框，选择加工程序文件保存路径，“文件名”处填写所要保存的 NC 文件的名字（此文件名可与机床中的程序名不一样），完成后保存。

3）在程序管理界面中找到要下载的加工程序名，选择读出按钮，再选择启动按钮，该文件即可传送到计算机中指定的路径下。

（3）数控系统在程序传输过程中可能会出现的信息提示见表 2-3-9。

表 2-3-9　报警信息表

报 警 信 息	含　义
OK	传送结束。没有出错
ERR EOF	接收到文本结束字符，但存档文件不完整
Time out	事件监控报警传送中断
User Abort	选择软件【停止】按钮中断传送
Error Com	端口 COM1 出错
NC/PLC Error	NC 故障报警
Error data	数据出错 1）文件读入时带/不带先导符 2）穿孔带形式传送的文件没有文件名
Error File Name	文件名不符合 NC 规范

第四章
伺 服 系 统

伺服系统（Servo mechanism）是一种自动控制系统，它的输出变量通常是机械或者位置的运动，其作用是使输出的机械位移（或转角）准确地跟踪输入的位移（或转角）。实现输出变量的某种状态能够自动、连续、精确地实现输入指令信号的变化规律。

数控机床伺服系统又称为位置随动系统、驱动系统、伺服机构或伺服单元。

第一节　伺服系统的组成

构成伺服机构的元件叫伺服元件。由驱动放大器（伺服放大器），驱动电动机（伺服驱动电动机）和检测器组成，如图 2-4-1 所示。在系统内包括了大量的电力电子器件，结构复杂，集成度高。

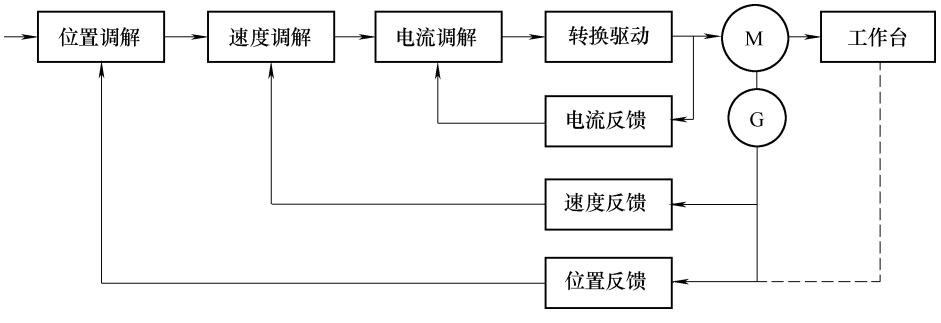


图 2-4-1　伺服系统的组成

位置、速度和电流环均由调节控制模块、检测和反馈部分组成；电力电子驱动装置由驱动信号产生电路和功率放大器组成。

严格来说，位置控制包括位置、速度和电流控制；速度控制包括速度和电流控制。

伺服系统一般由以下部分组成：

1）伺服电动机。

2）反馈信号检测装置。

3）伺服驱动单元。

一、伺服电动机

1. 伺服电动机的含义

伺服电动机是数控伺服系统的重要组成部分，是速度和轨迹控制的执行元件。

英文名称：Servo Motor。

2. 伺服电动机的特性

伺服电动机的速度控制精度、位置精度非常高，可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。伺服电动机转子转速受输入信号控制，并能快速反应，在自动控制系统中，用作执行元件，且具有机电时间常数小、线性度高、始动电压等特性，可把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。

3. 常用的伺服电动机

1）直流伺服电动机（调速性能良好）。

2）交流伺服电动机（主要使用的电动机）。

3）步进电动机（适于轻载、负荷变动不大的场合）。

4）直线电动机（高速、高精度）。

4. 几种典型的伺服电动机

（1）直流伺服电动机　伺服电动机的定子和转子由永磁体或铁心线圈构成，结构如图 2-4-2 所示。永磁体产生磁场，而铁心线圈通电后也会产生磁场。定子磁场和转子磁场相互作用产生力矩，使电动机带动负载运动，从而通过磁的形式将电能转换为机械能。

（2）交流伺服电动机　交流伺服电动机内部的转子是永磁铁，驱动器控制的 U/V/W 三相电形成电磁场，转子在此磁场的作用下转动，同时电动机自带的编码器反馈信号给驱动器，驱动器根据反馈值与目标值进行比较，调整转子转动的角度。伺服电动机的精度取决于编码器的精度（线数）。

交流伺服电动机也由定子和转子构成，结构如图 2-4-3 所示。定子上有两个线圈，即励磁线圈和控制线圈，两个线圈在空间相差 90°电角度。

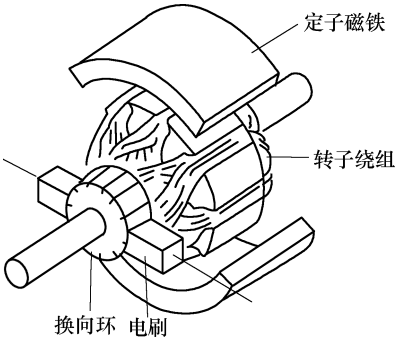


图 2-4-2　直流伺服电动机结构

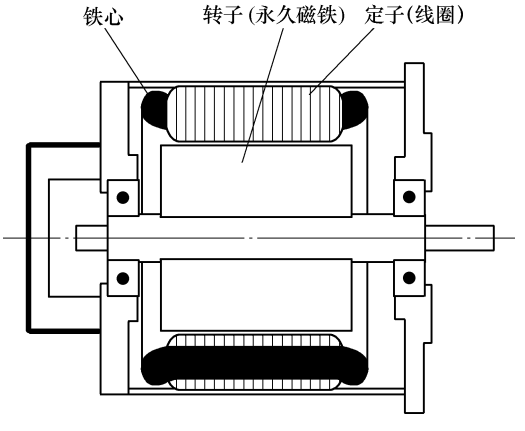


图 2-4-3　交流伺服电动机结构

（3）直线电动机 （或称线性马达）（Linear motor） 原理与传统的电动机不同，直线电动机是直接把输入电力转化为线性动能，与传统的扭力及旋转动能不同。

直线电动机的原理其实并不复杂，如图 2-4-4 所示。设想把一台旋转运动的感应电动机沿着半径的方向剖开，并且展平，这就成了一台直线电动机。在直线电动机中，相当于旋转电动机定子的部分，叫初级；相当于旋转电机转子的部分，叫次级。初级中通以交流，次级就在电磁力的作用下沿着初级做直线运动。这时初级要做得很长，延伸到运动所需要达到的位置，而次级则不需要那么长。实际上，直线电动机既可以把初级做得很长，也可以把次级做得很长；既可以初级固定、次级移动，也可以次级固定、初级移动。

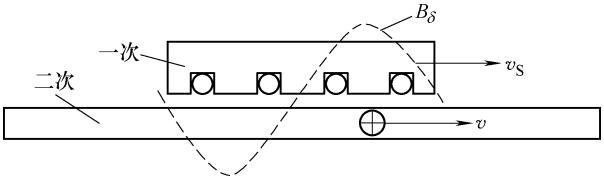


图 2-4-4 直线伺服电动机原理

如图 2-4-4 所示，在初级的多相线圈中通入电流后，会产生一个气隙基波磁场，其磁通密度波是直线移动的，也称之为行波磁场。由于磁场的变化可以推动次级移动，而且可以控制其速度和移动的距离。

二、伺服驱动器

伺服驱动器（Servo drives）又称为“伺服控制器”或“伺服放大器”，是用来控制伺服电动机的一种控制器，其作用类似于变频器作用于普通交流电动机，属于伺服系统的一部分，主要应用于高精度的定位系统。一般是通过位置、速度和力矩三种方式对伺服电动机进行控制，实现高精度的传动系统定位，目前是传动技术的高端产品。

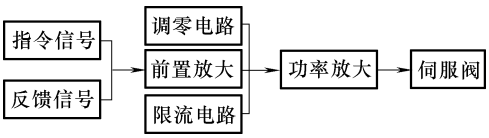


图 2-4-5 伺服放大器的原理

伺服放大器的原理是将输入指令信号（电压）同系统反馈信号（电压）进行比较、放大和运算后，输出一个与偏差电压信号成比例的控制电流给伺服阀力矩电动机控制线圈，控制伺服阀阀芯开度大小，并起限幅保护作用。伺服放大器的原理如图 2-4-5 所示。

1. 伺服放大器的三种控制方式

（1）转矩控制 通过外部模拟量的输入或直接的地址的赋值来设定电动机轴对外的输出转矩的大小，主要应用于需要严格控制转矩的场合。

（2）速度控制 通过模拟量的输入或脉冲的频率对转动速度进行控制。

（3）位置控制 伺服中最常用的控制，位置控制模式一般是通过外部输入的脉冲的频率来确定转动速度的大小，通过脉冲的个数来确定转动的角度，所以一般应用于定位装置。

2. 伺服系统出现故障时需检查的内容

1）电动机是否按规定参数运转。

2）场所环境有无异常。

3）冷却系统有无异常。

4）有无异常振动和声音。

5）螺栓的紧固情况。

6）导体绝缘体有无腐蚀和破损。

7）如果伺服出现故障，应由专业维修服务机构进行修理。

三、位置反馈装置

在整个数控机床中，伺服系统决定了机床的精度、运转的稳定性。在伺服系统中，构成系统的各个伺服元件性能尤其重要，直接影响了系统的稳定性。

特别是位置反馈装置采用了一些光敏元件和光栅的结构，由于其本身的结构和使用的材料非常脆弱，均会受到外力的破坏，或者污染而影响其正常工作。同时大多数反馈装置采用了数字式的信号处理方式，由于电压低很容易受到外界的电磁干扰。

1. 编码器

（1）编码器（encoder）　编码器是将信号（如比特流）或数据进行编制，转换为可以用通信、传输和存储的信号形式的设备。编码器把角位移或直线位移转换成电信号，前者称为码盘，后者称为码尺。

（2）编码器的分类　按照工作原理，编码器可分为增量式和绝对式两类。增量式编码器是将位移转换成周期性的电信号，再把这个电信号转变成计数脉冲，用脉冲的个数表示位移的大小。绝对式编码器的每一个位置对应一个确定的数字码，因此它的示值只与测量的起始和终止位置有关，而与测量的中间过程无关。

1）增量式位置编码器（图 2-4-6）

当码盘旋转时，透过码盘的光经过计数码盘被接收器收到后形成图 2-4-7 所示的脉冲波形。

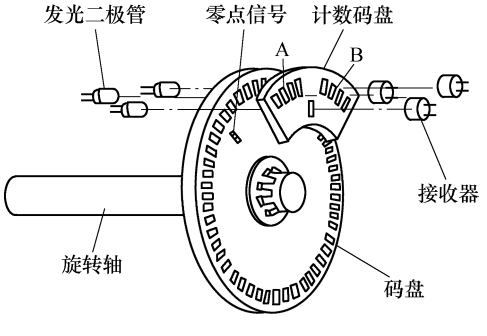


图 2-4-6　增量型编码器结构图

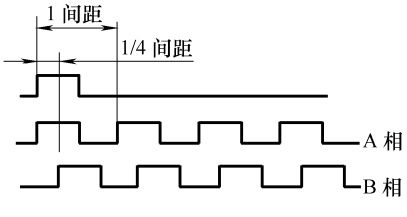


图 2-4-7　增量型编码器脉冲波形图

通过对 A 相和 B 相的比较就可以算出旋转的角度及旋转的方向。A 相和 B 相始终相差 90°。

2）绝对编码器的码盘上有许多道由里至外的刻线码道，每道刻线依次以 2 线、4

线、8 线、16 线……编排。在编码器的每一个位置，通过 n 个光眼读取每道刻线的通、暗，获得一组从 2 的零次方到 2 的 $n-1$ 次方变化的唯一的 2 进制编码（格雷码），这就称为 n 位绝对编码器。这样的编码器是由码盘的机械位置决定的，每个位置的编码是唯一、绝对的，所以称为绝对值编码器，它不受停电、干扰的影响。

3）编码器的分辨率是指电动机旋转一圈所能产生的脉冲数。比如大隈的 J 型编码器的分辨率可达 120 万线，精度非常高。

（3）编码器使用时的注意事项

1）不要让编码器受到外力冲击。

2）拆信号线应断电后再进行。

3）在布置走线时不要将编码器的线和强电电缆放到一起。

4）编码器的线一定要采取屏蔽保护措施，防止外部电磁干扰。

2. 光栅尺

1）光栅尺位移传感器（linear encoder）简称光栅尺，结构如图 2-4-8 所示。工作原理是由一对光栅副中的主光栅尺（即标尺光栅）和副光栅尺（即指示光栅）进行相对位移时，在光的干涉与衍射共同作用下产生黑白相间（或明暗相间）的规则条纹图形，称为莫尔条纹。经过光电器件使黑白（或明暗）相同的条纹转换成正弦波变化的电信号，再经过放大器放大，整形电路整形后，得到两路相差为 90°的正弦波或方波，送入光栅数显表计数显示。

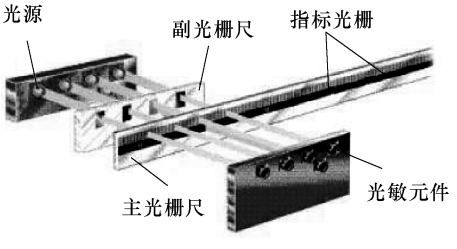


图 2-4-8　光栅尺的结构

2）常见光栅的工作原理都是根据物理上莫尔条纹的形成原理进行工作的测量反馈装置。作为闭环系统中常用的位移测量装置，光栅尺位移传感器经常应用于数控机床、加工中心以及测量仪器等方面，可用作直线位移或者角位移的检测。其测量输出的信号为数字脉冲，具有检测范围大、检测精度高、响应速度快的特点。

3）光栅线位移传感器的测量准确度，首先取决于标尺光栅刻线划分度的质量和指示光栅扫描的质量（栅线边沿清晰至关重要），其次才是信号处理电路的质量和指示光栅沿标尺光栅导向的误差。影响光栅尺测量准确度的是在光栅整个测量长度上的位置偏差和光栅一个信号周期内的位置偏差。

4）光栅尺使用注意事项。

① 一般将主尺安装在机床的工作台（滑板）上，随机床走刀而动，读数头固定在床身上，尽可能使读数头安装在主尺的下方。安装时必须注意切屑、切削液及油液的溅落方向。如果由于安装位置限制必须采用读数头朝上的方式安装时，则必须增加辅助密封装置。另外，一般情况下，读数头应尽量安装在相对机床静止的部件上，此时输出导线不移动、易固定，而尺身则应安装在相对机床运动的部件上（如滑板）。

② 拆信号线时应切断电源。

③ 光栅尺严禁剧烈震动撞击，以免破坏光栅尺，一旦光栅尺断裂，光栅传感器就

失效了。

④ 不要自行拆开光栅传感器，更不能任意改动主光栅尺与副光栅尺的相对间距，否则，一方面可能破坏光栅传感器的精度；另一方面还可能造成主光栅尺与副光栅尺的相对摩擦，损坏铬层也就损坏了栅线，造成光栅尺报废。

⑤ 应注意防止油及水污染光栅尺面，以免破坏光栅尺线的条纹分布，增大测量误差。

⑥ 光栅传感器应尽量避免在有严重腐蚀作用的环境中工作，以免腐蚀光栅铬层及光栅尺表面，破坏光栅尺质量。

5）国际知名品牌的光栅尺厂家有：德国的海德汉（Heidenhain），西班牙的发格（FAGOR），日本的索尼（SONY），日本的三丰（Mitutoyo）和瑞典的海克斯康（HEXAGON）等。

第二节　伺服系统的作用

一、伺服系统的作用

伺服系统在数控机床中的作用非常重要，机床的精度或者稳定性和它的性能紧密相关。它接收来自数控装置的进给指令信号，经变换、调节和放大后驱动执行机构，转化为直线或旋转运动。然后通过机械传动机构，使工作台（或滑板）精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动，最后加工出符合图样要求的零件。

伺服控制系统是一种能够跟踪输入的指令信号进行动作，从而获得精确的位置、速度及动力输出的自动控制系统。如果说 CNC 装置是数控系统的“大脑”，是发布“命令”的“指挥所”，那么进给伺服系统则是数控系统的“四肢”，是一种“执行机构”。它精确地执行由 CNC 装置发来的运动命令，精确控制执行部件的运动方向、进给速度与位移量。

二、伺服进给系统的要求

1. 调速范围宽

调速范围是指电动机能提供的最低转速和最高转速的区间。在数控机床中，由于所用刀具、加工材料及零件加工要求的不同，为保证在各种情况下都能得到最佳切削条件，就要求伺服系统具有足够宽的调速范围。

2. 位移精度高

伺服系统的精度是指输出量跟随输入量的精确程度。位移精度是指指令脉冲要求机床工作台进给的位移量和该指令脉冲经伺服系统转化为工作台实际位移量之间的符合程度。两者误差越小，位移精度越高。

3. 有足够的传动刚性和高的速度稳定性

具有足够的传动刚性，保证系统不易受到外界的干扰。具有高的速度稳定性是保证系统在受到外界干扰后，在短暂的调节过程后能达到新的或者恢复到原来平衡状态。

伺服系统具有较强的抗干扰能力，就可以保证进给速度均匀、平稳；稳定性直接影响数控加工精度和表面粗糙度。

4. 快速响应，无超调

为了保证生产率和加工质量，除了要求有较高的定位精度外，伺服驱动器还要求有良好的快速响应特性，即要求跟踪指令信号的响应要快，因为数控系统在起动、制动时，要求加速度足够大，缩短进给系统的过渡过程时间，减小轮廓过渡误差。

5. 低速大转矩，过载能力强

一般来说，伺服驱动器具有数分钟甚至半小时内 1.5 倍以上的过载能力，在短时间内可以过载 4 ~6 倍而不损坏。

6. 可靠性高

要求数控机床的进给驱动系统可靠性高、工作稳定性好，具有较强的温度、湿度、振动等环境适应能力和很强的抗干扰的能力。

三、伺服放大器可调参数

（1）位置比例增益　该参数用于设定位置环调节器的比例增益；设置值越大，增益越高，刚度越大，相同频率指令脉冲条件下，位置滞后量越小。但数值太大可能会引起振荡或超调。

（2）位置前馈增益　该参数用于设定位置环的前馈增益；设定值越大时，表示在任何频率的指令脉冲下，位置滞后量越小；位置环的前馈增益大，控制系统的高速响应特性提高，但会使系统的位置不稳定，容易产生振荡。

（3）速度比例增益　该参数用于设定速度调节器的比例增益；设置值越大，增益越高，刚度越大。参数数值根据具体的伺服驱动系统型号和负载值情况确定。一般情况下，负载惯量越大，设定值越大。

（4）速度积分时间常数　该参数用于设定速度调节器的积分时间常数；设置值越小，积分速度越快。参数数值根据具体的伺服驱动系统型号和负载情况确定。一般情况下，负载惯量越大，设定值越大。

（5）速度反馈滤波因子　该参数用于设定速度反馈低通滤波器特性；数值越大，截止频率越低，电动机产生的噪声越小。如果负载惯量很大，可以适当减小设定值。数值太大，使得响应变慢，可能会引起振荡。

第三节　数控伺服系统与加工精度和速度

加工精度和速度是数控机床重要性能指标。高加工精度机床保证了零件的质量；高加工速度保证了生产效率。位置伺服控制系统的位置精度在很大程度上决定了数控机床的加工精度。提高数控机床的加工精度和速度的方法有以下三种。

一、合理的伺服参数

在轮廓加工过程中，各坐标轴常要求随加工形状的不同瞬时起动、停止或改变速

度，控制系统应同时精确地控制各坐标运动的位置与速度。由于系统的稳态和动态特性，影响了各坐标轴的协调运动和位置的精确性，从而产生了轮廓的形状误差。配合机械特性选择合适的伺服参数就能够同时提高系统的精度和速度。

1. 位置环增益

位置环增益是数控机床伺服进给系统的重要参数。位置环增益越大，响应越快，位置控制精度越高，但也容易使位置环产生振荡。在数控机床伺服进给系统中，若每个进给轴的位置环增益不匹配，则会产生轮廓误差。所以，各进给轴的位置环增益设定要相互匹配。

2. 速度环 PI 调节器

P 是指比例控制（Proportional），I 时指积分控制（Integral）。

速度调节器是比例积分（PI）调节器，其 PI 值完全取决于所驱动坐标轴的负载大小和机械传动系统（导轨、传动机构）的传动刚度与传动间隙等机械特性。一旦这些特性发生明显变化时，首先需要对机械传动系统进行修复工作，然后重新调整速度环（PI）调节器。速度环增益是决定伺服控制响应性的重要参数，对机床的切削精度和循环时间有很大影响。

二、补偿功能

数控机床的传动机构一般均为滚珠丝杠副。当机床几何精度得到保证后，机床轴线的反向偏差与滚珠丝杠的螺距误差是影响机床定位精度与重复定位精度的主要因素，对机床轴线的反向偏差、滚珠丝杠的螺距误差进行补偿能极大地提高机床精度。数控系统也对这两个补偿参量设置了专门的参数，并将其补偿功能作为控制系统的基本控制功能。

1. 螺距误差补偿

螺距误差补偿主要是对数控机床各进给轴的滚珠丝杠在传动过程中产生的误差进行补偿。螺距误差补偿是在机床的几何精度（床身水平、平行度和垂直度等）调整完成后进行的。

机床的螺距误差补偿功能包括线性轴和旋转轴两种方式，分别可以对直线轴和旋转工作台的定位精度进行补偿。补偿原点取各坐标轴的机床原点作为参考点，以原点为中心设定补偿点，补偿间隔相等，并在补偿点进行补偿。

数控系统的螺距误差补偿有以下参数需要设定：螺距误差补偿点数，补偿间隔，轴线负端最远补偿位置（机床坐标系），轴线正端最远补偿点位置（机床坐标系），补偿点的补偿值和轴线的补偿点间距。

2. 反向间隙补偿

在数控机床的进给传动链中，齿轮传动、滚珠丝杠及螺母副等均存在反向间隙，伺服电动机在反向运动时是空转而工作台实际不运动。

对于采用半闭环伺服系统的数控机床，反向间隙的存在会影响到机床的定位精度和重复定位精度，从而影响到产品的加工精度。数控系统的反向间隙补偿，可以在加工过程中自动补偿一些有规律的误差，提高零件的加工精度。并且随着数控机床使用

时间的增长，反向间隙还会因磨损造成的运动副间隙的增大而逐渐增加，因此需定期对数控机床各坐标轴的反向间隙进行测定和补偿。

3. 热补偿

热补偿是指补偿由于机床运动导致的温度变化或环境温度变化而引起的热变形误差量。安装在机床不同部位的温度传感器将温度信息发送到温度测量装置。根据接收到的信息和机床的运行状态，数控系统计算当前的热变形量。根据计算的结果对各轴的位置输出量进行补偿。温度测量装置一般安装在各进给轴的传动机构的附近、主轴箱体附近、机床不移动部件上（比如床身）。

数控系统计算热变形量的依据就是热变形误差补偿模型。由于机床的结构不一样，其变形量和温度变化之间的模型也不相同。在不同温度下对机床各进给轴的定位误差进行测量，建立机床受热后的温度变化、环境温度变化和各轴的定位误差之间的模型。数控系统利用实时采集的温度、根据建立的模型就可以计算出瞬时的热变形误差量。然后，利用补偿值（热变形误差量的相反数）对机床的各轴位移进行补偿。

4. 纳米技术

在一些高档数控系统中采用了纳米插补技术，以提高机床的加工精度。纳米插补是指数控系统产生纳米为单位的指令给伺服控制器，使得伺服控制器的位置指令圆滑，从而提高了加工表面的平滑。

三、模具加工的 NURBS 功能

在传统的模具加工中，基本上都是用直线和圆弧组合进行对几何模型轮廓进行逼近，对于复杂的高级曲面及曲线，这种插补使数据量大大增加，增加了数据传输的时间，而且加工精度和表面质量都往往很难满足要求，对高速加工更会产生不良效果。

NURBS 曲线全称为非均匀有理 B 样条（Non- Uniform Rational B- Splines）曲线，它的特征是可以在任意点上进行分割和合并。

数控系统中配备了 NURBS 曲线的实时插补器，就可以将读入数控加工程序中的各坐标点拟合成 NURBS 曲线。NURBS 曲线轮廓如图 2-4-9 所示。

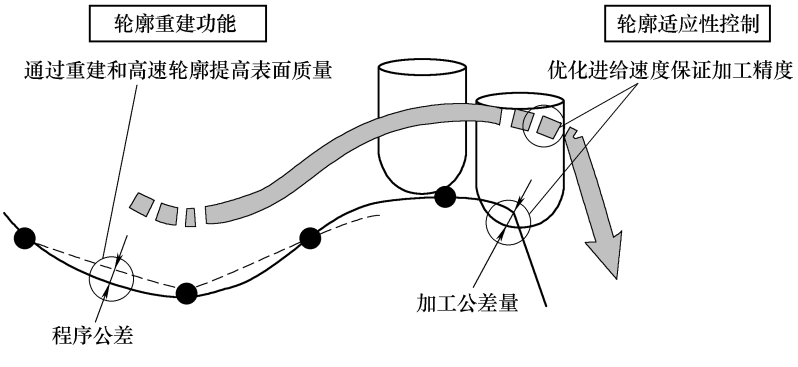


图 2-4-9　NURBS 曲线轮廓

在加工程序中的使用 NURBS 指令对 G01 微线性近似具有下列优点，包括大量的自由曲线加工以及用于压模和塑料模的加工。

1）可进行无近似误差的轮廓加工（轮廓重建功能）。

2）可缩减加工程序容量。

3）消除不必要的加减速就能够而达到高进给速度加工的结果，加工的轮廓更加光滑。

利用 NURBS 曲线进行插补，能有效地提高实时插补的速度和精度，从而进一步提高数控系统的工作效率。NURBS 插补器如图 2-4-10 所示。

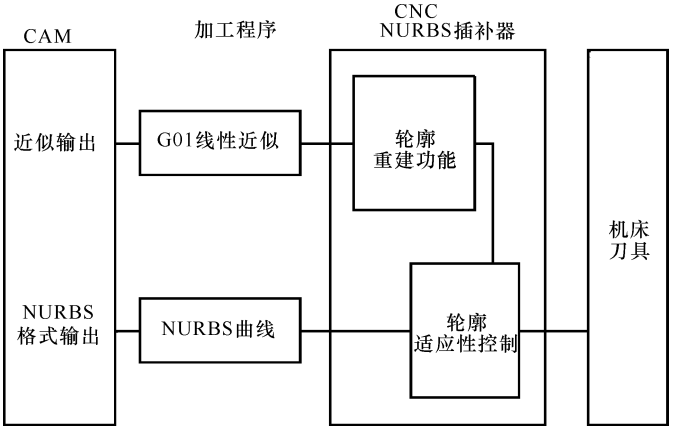


图 2-4-10　NURBS 插补器

第五章
工 艺 知 识

第一节　基本概念

一、机械产品的生产过程与工艺过程

机械产品的生产过程仅指机械产品从原材料开始到制成机械产品之间各相互关联的劳动过程，机械产品的生产过程由以下三部分组成：

1）准备生产过程：包括产品设计、工艺设计和生产准备。

2）工艺过程：是生产过程的主体，是指生产过程中那些直接改变材料的几何形状、物理机械性能等过程，制成机械零件并装配成机械的部分。

3）辅助生产过程：产品生产过程中除工艺过程外那些次要但也不可缺少的部分，如运输、保管和包装等。

二、工艺过程

工艺过程是改变材料或工件的形状、尺寸、表面位置、表面状况、物理机械性能、外观及抗腐蚀能力，零件相互位置关系及整机性能直接相关的生产过程，称为工艺过程。按作用和效果可分为以下六类：

1）改变材料形状的工艺过程。

2）把零件加工到固定尺寸的工艺过程。

3）改变表面粗糙度的工艺过程。

4）改变金属材料的物理机械性能的工艺过程。

5）改善零部件或机械外观，增强对环境腐蚀的防护能力的工艺过程。

6）用以连接零件或材料的工艺过程。

三、机械加工工艺过程及其组成

机械加工工艺过程是用机械加工的方法改变毛坯的形状、尺寸、表面质量及材料的物理机械性能，使其成为产品零件的过程。机械加工工艺过程是由一个或若干个工

序组成的，而每一个工序又可分为若干个安装、工位、工步、走刀和操作组成，它们按一定顺序排列，逐步地改变毛坯或原材料的形状、尺寸和材料的性能，使之成为合格的零件。机械加工的工艺过程及其组成如图 2-5-1 所示。

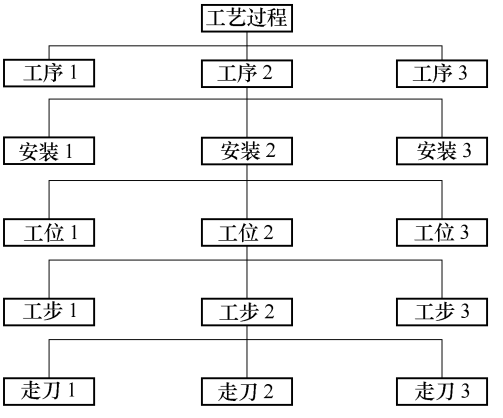


图 2-5-1　机械加工工艺过程及其组成

1）工序的定义。工序是指在同一工作地点，有一个或一组工人同时加工一个或多个工件时，连续进行的那一部分工艺过程，称为一个工序。

划分工序的条件是：工作地点、加工人员、工件、加工内容和设备工具均不变，而且时间要连续。这六项中有一项改变即成为另一工序。将工艺过程划分为工序是生产分工的必然结果，不过工序的划分并无不变的准则，工序的划分主要根据产品的生产规模和具体生产条件，按照方便加工、有利管理、生产率高和加工成本低的原则比较确定。可根据其产量和车间设备的具体情况采用不同的加工工艺方案。

加工图 2-5-2 所示的阶梯轴，属于单件小批量生产时，可采用表 2-5-1 方案进行加工；属于大批量生产时，应采用表 2-5-2 方案进行加工。

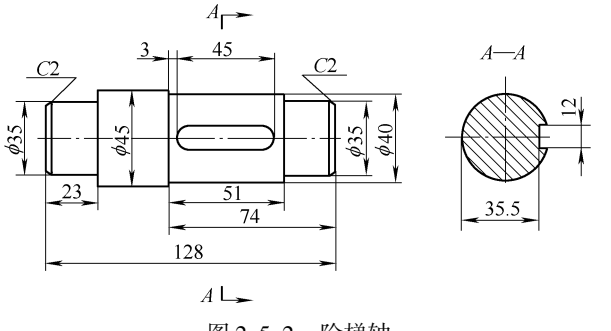


图 2-5-2　阶梯轴

2）安装。安装是指工件经一次装夹后所完成的那一部分工序。目的是使工件相对于刀具始终处于正确的位置，在切削运动过程中获得预期的表面。安装包括定位和夹

表 2-5-1　单件小批量生产的加工工艺

工　序　号	工艺及工步内容	设　　备
1	车端面、钻中心孔、车外圆、切空刀槽及倒角	车床
2	铣键槽、去毛刺	铣床
3	磨外圆	外圆磨床

表 2-5-2　大批量生产的加工工艺

工　序　号	工艺及工步内容	设　　备
1	铣两端面、钻中心孔	专用机床
2	车外圆、切空刀槽及倒角铣键槽、去毛刺	车床
3	铣键槽	铣床
4	去毛刺	钳工台
5	磨各外圆	外圆磨床

紧两个部分，在同一工序中，工件可能被安装一次或多次。例如表 2-5-2 的工序 3 中，由一次安装完成铣键槽。工序 5 中，磨各外圆至少二次安装才能完成。零件在加工过程中应尽可能减少安装次数，因为安装次数越多，安装误差就越大，而且安装工件的辅助时间也要增多。

3）工位。工位是为了完成一定的工序内容，一次装夹工件后，工件在机床或夹具中占有正确位置过程，即工位。工件每一次安装至少有一个工位。为了减少安装次数，常采用多工位夹具、回转工作台或在多轴机床上一次安装后进行多工位加工。多工位加工，可以减少工件安装次数，缩短辅助时间，提高生产效率。如图 2-5-3 所示为利用回转在工作台一次安装中顺序完成装卸工件、钻孔、扩孔和铰孔多个工位加工的实例。

4）工步。在一次安装中，工件的被加工表面，所用的刀具及切削用量均不变的条件下所完成的部分工艺内容，称为工步。如工作条件有一项发生变动，即成为另一工步，因而一次安装或一个工位均包括一个或多个工步。简单的工序可能只有一个工步，而复杂的工序所包括的工步数则可能很多。如图 2-5-4 所示的精确孔的加工顺序为钻孔、扩孔和铰孔，加工表面未变，但刀具及切削用量发生变动，故分为三个工步。

5）走刀。在一个工步中，如果加工余量较大不宜一次切除时，需合理规定切削深度分层切除，每切去一层切削层的工作循环，称为一次走刀。一个工步可能包括一次或多次走刀。

6）操作。操作是指完成一次走刀，工步或工序所必需的各种动作。包括起动机床、对刀、进给、退刀、回位、停机、卸下工件、测量及安装等，这些动作有的是手动操作，有的则是自动执行。

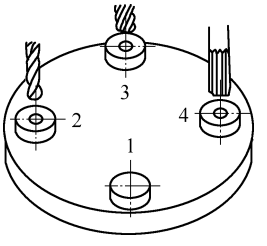


图 2-5-3　多工位加工

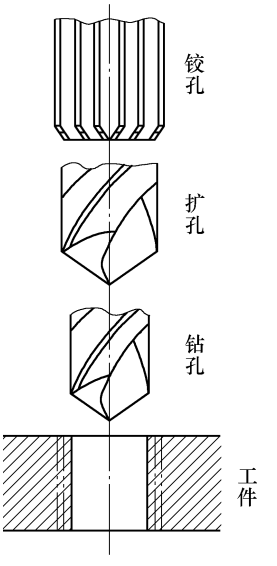


图 2-5-4　精确孔的加工顺序

四、基准

1. 基准的概念及分类

基准是用来确定生产对象上几何要素间的几何关系所依据的那些点、线和面。一个几何关系只能有一个基准。根据作用不同，基准可分为设计基准和工艺基准。

2. 设计基准

零件设计图样上用以确定任意几何要素所采用的基准。

3. 工艺基准

在零件加工和装配等工艺过程中使用的基准总称，叫工艺基准。按用途不同又可分为工序基准、定位基准、测量基准和装配基准。

1）工序基准。在工序图上用来确定本工序加工表面位置加工后的尺寸、位置的基准。

2）定位基准。工件在机床上或夹具中加工时用作定位的基准。定位基准还可分为粗基准和精基准。

3）测量基准。工件在测量时采用的基准。

4）装配基准。装配时用来确定零件或部件在产品中的相对位置所采用的基准。

第二节　定位、找正与夹紧

一、物体的自由度

1. 物体的自由度定义

一个物体在空间的位置是不确定的，这种位置的不确定性，在空间坐标系中，可

以用六个相互独立的自由度表示。故可以认为任何物体均具有六个自由度，如图 2-5-5 所示。

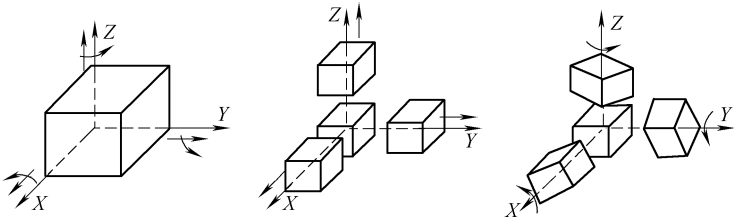


图 2-5-5　物体的六个自由度

物体沿 X 轴方向移动自由度，用 $\overleftrightarrow{X}$ 表示。

物体沿 Y 轴方向移动自由度，用 $\overleftrightarrow{Y}$ 表示。

物体沿 Z 轴方向移动自由度，用 $\overleftrightarrow{Z}$ 表示。

物体绕 X 轴方向转动自由度，用 $\overset{\frown}{X}$ 表示。

物体绕 Y 轴方向转动自由度，用 $\overset{\frown}{Y}$ 表示。

物体绕 Z 轴方向转动自由度，用 $\overset{\frown}{X}$ 表示。

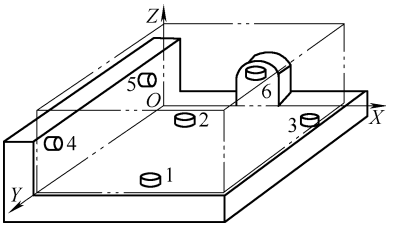


图 2-5-6　工件的六点定位

2. 六点定位原理

物体的六个自由度，可以用六个定位点加以完全限制而实现定位，称作六点定位原理，如图 2-5-6所示。

二、工件定位的原则

1. 工件定位的概念

工件在安装时的定位，就是使一批或一个工件在机床加工时都能占据相同的位置，以保证工件相对刀具及成形运动处于准确的位置，而使被加工表面达到规定的位置精度。工件定位的实质就是要限制对加工有不良影响的自由度。无论工件的形状和结构怎么不同，它们的六个自由度都可以用六个支承点限制，只是六个支承点的分布不同罢了。

用合理分布的六点支承点，限制工件六个自由度的法则，称为六点定则，又称作六点定位原理。支撑点分布必须合理，否则六个支撑点限制不了工件的六个自由度，或不能有效地限制工件的六个自由度。

2. 定位原理的应用

六点定位原理对机械加工时工件的安装定位具有普遍的意义，具体应用应注意以下情况：

1）两种自由度。第一种自由度：直接影响被加工表面的位置，而必须加以限制的自由度。表 2-5-3 中的要求限制的自由度即为第一种自由度。

第二种自由度：不直接影响被加工表面的位置，因而可以不一定要限制的自由度。

对于工件每一工序而言被加工表面的具体要求不同，其第一种自由度可以为一个至六个，其余的为第二种自由度。

2）完全定位与不完全定位。如果限制工件的全部六个自由度，使工件在夹具中占有完全确定的唯一位置，称为完全定位，图 2-5-7 所示的工件定位是完全定位的例子。当限制工件的自由度少于六个时，则为不完全定位。图 2-5-8 所示的圆盘工件，装入钻模夹具中钻孔 *A* 时，只要孔 *A* 中心在以 *R* 为半径的圆周上即可，而不要求在圆周上的哪个位置。因此，不需要限制工件绕 *Z* 轴转动的自由度。

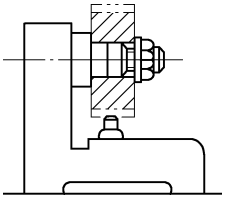


图 2-5-7　带孔工件用夹具

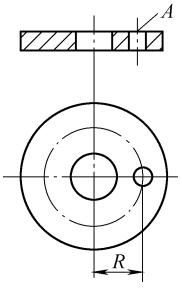
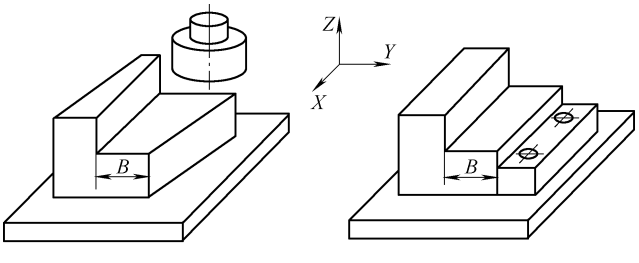


图 2-5-8　盘类工件的不完全定位

3）欠定位与过定位。工件在定位时，如果有未被限制的第一种自由度为欠定位，如图 2-5-9a 所示。欠定位在加工中是绝对不允许的，应需要限制 *Y* 向的自由度，如图 2-5-9b 所示。工件在定位时，如果定位点数超过六个或自由度被重复限制时，则称为过定位。过定位在加工中则应尽量避免。



a)　　b)

图 2-5-9　欠定位示例

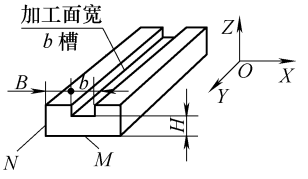
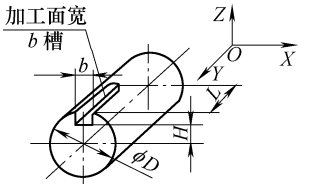
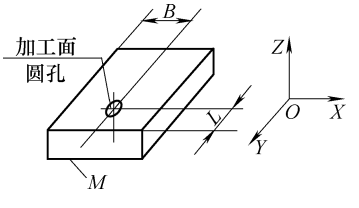
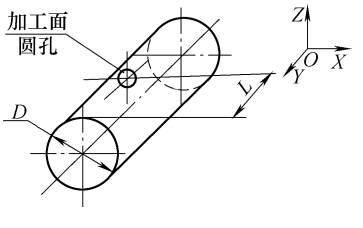
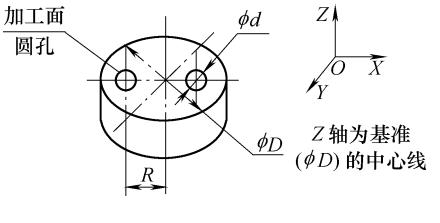
4）常用的加工方法所需限制的自由度。工件在加工前，需确定哪些自由度需要限制，哪些自由度不需要限制，应该被限制的自由度的数目，它们完全由工件在该工序的加工内容和技术要求来确定。表 2-5-3 为常见加工方式所需要限制的自由度。

3. 定位方法和定位元件

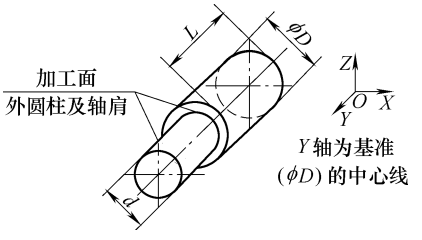
工件在定位时，与定位元件接触的表面称为定位基准。工件在夹具中定位，实际上就是确定工件上定位基准的位置。所以定位方法和定位元件的选用，主要取决于定位基准的形状、尺寸和精度要求，由此选择定位元件的结构形状、支承点数目和布置，

以及如何保证工件定位稳定可靠定位、误差最小。

表 2-5-3　常见加工方式所需要限制的自由度

工序简图	位置要求		机床与刀具	要求限制的自由度
	1）尺寸 B 2）尺寸 H 3）槽侧面与 N 面平行 4）槽底面与 M 面平行		立式铣床 立铣刀	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$
	1）尺寸 B 2）尺寸 L 3）b 与轴线平行并对称		立式铣床 立铣刀	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Z}$
	通孔	1）尺寸 B 2）尺寸 L 3）孔中心线垂直于 M 面	立式钻床 钻头	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$
	不通孔			$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$
	通孔	1）尺寸 L 2）加工孔中心与轴 D 的轴线垂直并相交	立式钻床 钻头	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$
	不通孔			$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Z}$
	通孔	1）尺寸 R 2）对孔 d 的角度位置 3）圆孔与底面垂直	立式钻床 钻头	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$
	不通孔			$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{X}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$

（续）

工序简图	位置要求	机床与刀具	要求限制的自由度
	1）加工面 D 与 d 同轴 2）尺寸 L	车床	$\overleftrightarrow{X}$ $\overleftrightarrow{Y}$ $\overleftrightarrow{Z}$ $\widehat{Y}$ $\widehat{Z}$

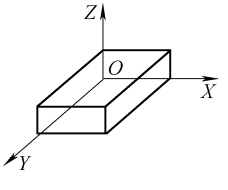
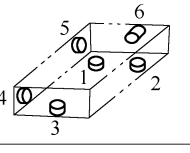
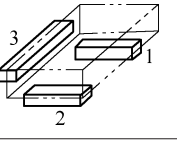
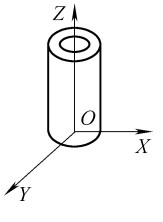
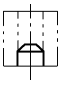
1）工件以平面定位。在零件装夹中，常用的平面定位元件有：固定支承、可调支承、自位支承及辅助支承等。支承件可分为基本支承和辅助支承两类：前者是用来限制工件的自由度的，是具有独立定位作用的定位支承。后者是用来加强工件的安装刚度的，不起定位作用的支承（表 2-5-4）。

2）工件以外圆柱面定位。在零件装夹中，常用于外圆表面的定位元件有定位套、支承板和 V 形块等（表 2-5-4）。

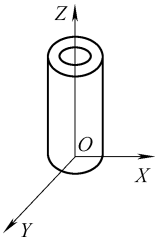
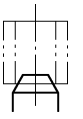
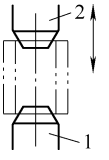
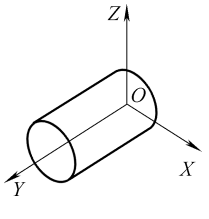
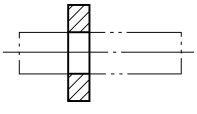
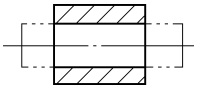
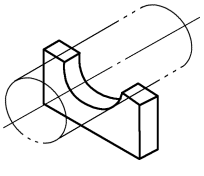
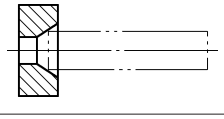
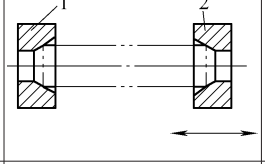
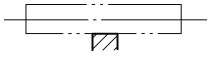
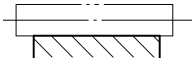
3）工件以孔定位。常用于圆孔表面的定位元件有定位销、刚性心轴和锥度心轴等（表 2-5-4）。

4）工件以特殊表面定位。特殊表面主要是指工件以中心孔、导轨面等。

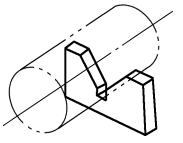
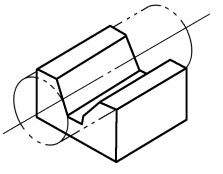
表 2-5-4　常用定位元件所限制的自由度

工件定位基面	定位元件	定位简图	定位元件特点	限制的自由度
平面 	支承钉			1、2、3——$\vec{Z}$、$\widehat{X}$、$\widehat{Y}$ 4、5——$\vec{X}$、$\widehat{Z}$ 6——$\vec{Y}$
	支承板			1、2——$\vec{Z}$、$\widehat{X}$、$\widehat{Y}$ 3——$\vec{X}$、$\widehat{Z}$
圆孔 	定位销（心轴）		短销（短心轴）	$\vec{X}$、$\vec{Y}$
			长销（长心轴）	$\vec{X}$、$\vec{Y}$ $\widehat{X}$、$\widehat{Y}$

（续）

工件定位基面	定位元件	定 位 简 图	定位元件特点	限制的自由度
圆孔 	锥销			$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$
			1—固定销 2—活动销	$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$ $\hat{X}$、$\hat{Y}$
外圆柱面 	定位套		短套	$\vec{X}$、$\vec{Z}$
			长套	$\vec{X}$、$\vec{Z}$ $\hat{X}$、$\hat{Z}$
	半圆套		短半圆套	$\vec{X}$、$\vec{Z}$
			长半圆套	$\vec{X}$、$\vec{Z}$ $\hat{X}$、$\hat{Z}$
	锥套			$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$
			1—固定锥套 2—活动锥套	$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$ $\hat{X}$、$\hat{Z}$
	支承板或支承钉		短支承板或支承钉	$\vec{Z}$
			长支承板或两个支承钉	$\vec{Z}$、$\hat{X}$

（续）

工件定位基面	定位元件	定 位 简 图	定位元件特点	限制的自由度
外圆柱面	V 形块		窄 V 形块	$\vec{X}$、$\vec{Z}$
			宽 V 形块	$\vec{X}$、$\vec{Z}$ $\hat{X}$、$\hat{Z}$

三、工件在安装时的夹紧

1. 对夹紧的基本要求

工件在机床上或夹具中定位后均需进行夹紧，以防止在切削过程中工件因受到切削力、惯性力以及重力等外力的作用而离开其正确位置。若切削时工件松动或移动，不仅影响加工精度，而且可能带来人身安全隐患。因此，对夹紧及夹紧装置提出以下基本要求：

1）夹紧时不应破坏工件在定位时所取得的正确位置。

2）夹紧应可靠而适当，不能因外力变动而致工件产生位移、振动或变形。

3）夹紧系统应操作安全、方便且省力，能够以较小的作用力获得满意的夹紧效果，并能在一定范围内调节。

4）夹紧系统的复杂程度、工作效率和自动化程度应与生产规模相适应。

2. 夹紧力的确定

夹紧力的确定主要是指正确确定夹紧力的方向、作用点和大小。

（1）夹紧力方向的确定

1）夹紧力的方向应垂直于主要定位基准面。一般来讲，工件的主要定位基准面的面积加大，精度较高，限制的自由度较多，夹紧力垂直作用于此面上，有利于保证工件的准确精度，如图 2-5-10a 所示；图 2-5-10b 所示的主要定位基准面小，夹紧力的方向与工件切削力方向不一致，工件易产生位移。

2）夹紧力的方向应使工件产生的变形最小。

3）夹紧力的方向应有利于减小夹紧力。当夹紧力与切

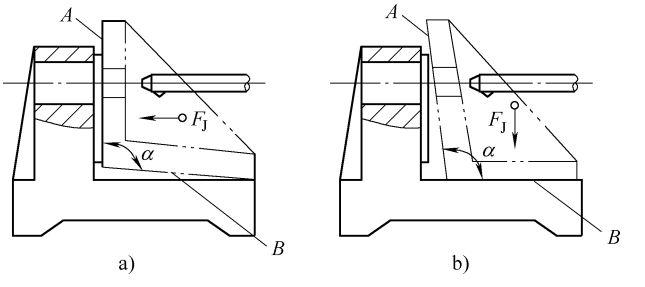


图 2-5-10　夹紧力方向垂直于主要定位基准面

A—主要定位基准面　*B*—普通定位基准面

削力的方向相同时所需的夹紧力最小。图 2-5-11 所示为工件在夹具中加工时常见的几种受力情况，显然图 2-5-11a 最合理，图 2-5-11f 最不合理。

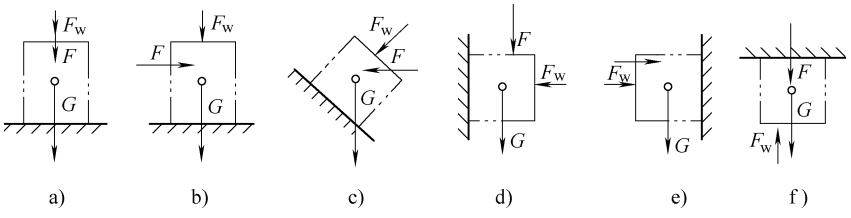


图 2-5-11　夹紧力方向与大小的关系

（2）夹紧力的作用点　夹紧力的作用点是指夹紧元件与工件相接处的一块小面积。选择夹紧力作用点的位置和数目，应考虑工件定位稳定可靠，防止加紧变形，确保工序的加工精度。

1）夹紧力的作用点应能保持工件定位稳定，作用点应在支承范围之内（可加辅助支承），避免夹紧力与支承力构成力矩，引起工件产生位移或偏转，如图 2-5-12 所示。

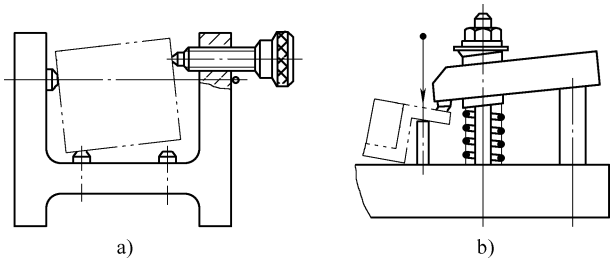


图 2-5-12　夹紧力作用点与定位支承的位置关系

2）夹紧力的作用点应选在工件刚性较强部位，使被夹紧工件的变形尽可能小。图 2-5-13b所示为薄壁套夹紧示意图。

3）夹紧力的作用点应尽量靠近切削部位，以提高夹紧的可靠性，若切削部位刚性差可加辅助支承。增加工件加工部位刚性防止或减少振动的产生，如图 2-5-14b 所示。

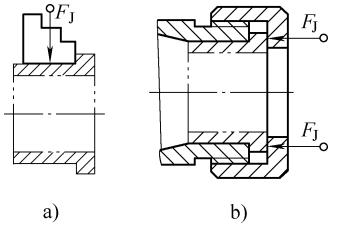


图 2-5-13　薄壁套夹紧示意图

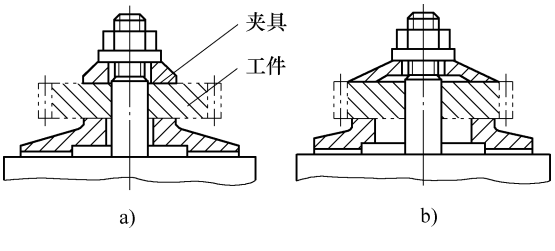


图 2-5-14　夹紧力作用点靠近切削部分
a）不合理　b）合理

（3）夹紧力的大小　确定夹紧力大小的原则是夹紧力既应足够大以防工件产生位移或振动，又应尽可能小以免工件发生夹紧变形（弹性变形和接触变形）。

理论上，夹紧力的大小应与作用在工件上其他力（力矩）相平衡；而实际上，夹紧力的大小还与工艺系统的刚度、夹紧机构的传递效率等因素有关，计算是很复杂的。因此，实际中常采用估算法、类比法和试验法确定所需的夹紧力。

用估算法确定夹紧力的大小时，为简化计算，是将夹具和工件看成一个刚性系统，根据工件所受的切削力、夹紧力（大型工件应考虑重力、惯性等）的作用情况，分析加工过程中对夹紧力最不利的状态，估算该状态下的夹紧力，按静力平衡原理计算出理论夹紧力，最后再乘以一个安全系数得出实际所需夹紧力。一般安全系数取值为 $k = 1.5 \sim 3$。

第三节　工艺系统受力及内应力对加工的影响

一、工艺系统受力变形引起的加工误差

工艺系统在切削力、传动力、惯性力、夹紧力以及重力等外力的作用下，产生相应的变形和振动，将会破坏刀具和工件之间的成形运动的位置关系和速度关系，影响切削运动的稳定性，从而产生各种加工误差，并使加工表面粗糙和产生波纹度。图 2-5-15所示为工艺系统受力变形引起的加工误差。

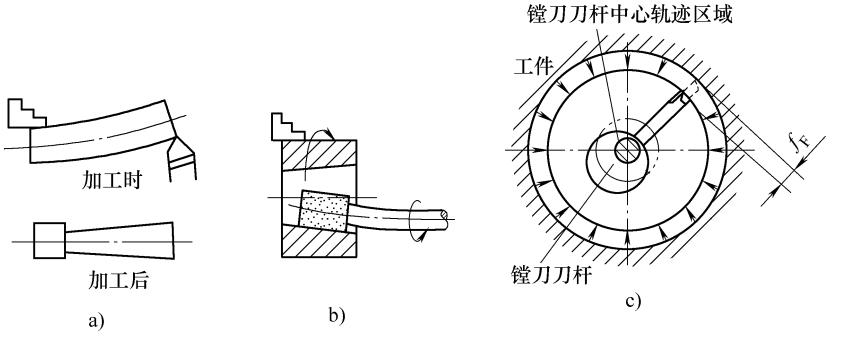


图 2-5-15　工艺系统受力变形引起的加工误差

a）工件变形　b）砂轮轴变形　c）切削力对镗杆的影响

1. 切削过程中受力点位置变化引起的加工误差

切削过程中，工艺系统的刚度随切削力着力点位置的变化而变化，引起系统变化的差异，使零件产生加工误差。

1）机床的变形。在两顶尖车削粗而短的光轴时，由于刚度较大，在切削力作用下变形，相比于机床，夹具和刀具的变形要小得多，故可忽略不计；此时，加工系统的总变形完全取决于机床头、尾架（包括顶尖）和刀架（包括刀具）的变形。工件产生的误差为双曲线圆柱度误差。

2）工件变形。在两顶尖车削细长轴时，由于工件细长，刚度小，在切削力的作用下，其变形大大超过机床、夹具和刀具的变形。因此，机床、夹具结合刀具承受力可忽略不计，工艺系统的变形完全取决于工件的变形。工件产生腰鼓形圆柱度误差。

3）工艺系统总变形。当同时考虑机床和工件的变形时，工艺系统的总变形为两者和。

2. 切削力大小变化引起的加工误差——复映误差

工件的毛坯外形虽然具有粗略的零件形状，但它在尺寸、外形以及表面层材料硬度上都有较大的误差。毛坯的这些误差在加工时使切削深度不断发生变化，从而导致切削力变化，进而引起工艺系统产生相应的变形，使得零件在加工后还保留与毛坯表面类似的形状或尺寸误差。当然工件表面残留的误差比毛坯表面误差要小得多。这种现象称为误差复映规律，所引起的加工误差称为复映误差。

3. 夹紧力和重力引起的变形

除切削力外，传动力、惯性力、夹紧力等其他作用力也会使工艺系统发生变化，从而引起加工误差，影响加工质量。装夹时，工件刚性较差或夹紧力大小不当时也会使工件产生相应的变形，造成加工误差。图2-5-16所示为自定心卡盘加持薄壁工件误差示意图。为了减少加工误差，应使夹紧力均匀分布，可采用开口过渡环装夹，如图2-5-16d所示。

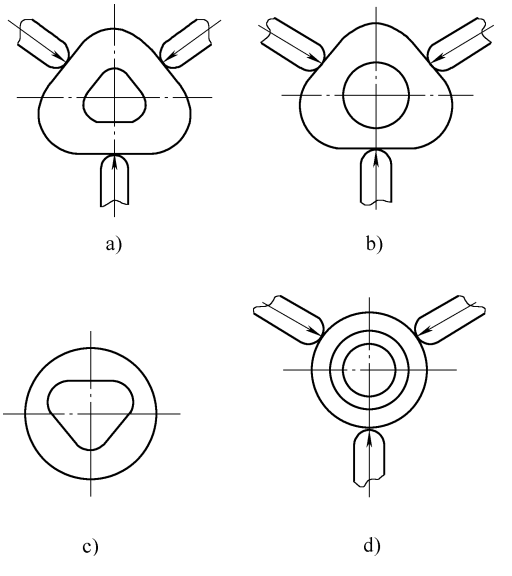


图2-5-16　自定心卡盘加持薄壁工件误差示意图

4. 减小工艺系统受力变形的措施

减小工艺系统受力变形，不仅可以提高零件的加工精度，而且有利于提高生产率。因此，生产中必须采取有效措施，减小工艺系统受力变形。

（1）提高工艺系统各部分刚度　提高工件加工时的刚度，有些工件因其自身刚度很差，加工中将产生变形而引起加工误差，因此必须设法提高工件自身刚度。

（2）提高工件安装时的夹紧刚度　对薄壁件，夹紧时应选择适当的夹紧方法和夹紧部位。

（3）提高机床部件的刚度　机床部件的刚度在工艺系统中占有很大的比重，在机械加工时常用一些辅助装置提高其刚度。

（4）提高接触刚度　由于部件的接触刚度远远低于实体零件本身的刚度，因此，提高接触刚度是提高工艺系统刚度的关键，常用方法如下：

1）改善工艺系统主要接触面的配合质量。如机床导轨副、锥体与锥孔、顶尖与顶尖等配合采用刮研与研磨，以提高配合表面的形状精度，降低表面粗糙度值。

2）预加载荷。由于配合表面的接触刚度随所受载荷的增大而不断增大，所以对机床部件的各配合表面施加预紧载荷不仅可以消除配合间隙，而且还可以使接触表面之间产生预变形，从而大大提高接触刚度。

二、内应力

1. 内应力的基本概念

内应力也称残余应力，是指外部载荷去掉后仍残留于物体内部的应力。内应力是由于金属内部组织发生了变化而产生的。其产生的外界因素为热加工和冷加工。

具有内应力的工件，处在一种不稳定状态中，它内部的组织有强烈的恢复到没有内应力稳定状态的倾向。即使在常温下工件的内部组织也不断发生变化，直到内应力完全消失为止。在这一过程中，工件的形状逐步产生变形（如翘曲变形），从而丧失其原有精度。如果把存在内应力工件装配到机器中，则会因其在使用中发生变形而破坏整台机器的精度。

2. 内应力的产生及其对零件加工精度的影响

1）毛坯制造中产生的内应力。在铸、锻、焊及热处理等过程中，由于工件各部分热胀冷缩不均匀以及金相组织的变化使毛坯内部产生了相当大的内应力。毛坯结构越复杂，各部分的壁厚越不均匀，散热条件差别越大，毛坯内部产生的内应力也越大。具有内应力的毛坯在短时间还看不出变化，内应力暂时处于相对平衡的状态，但当切去一层金属后，就打破了这种平衡，内应力重新分布，工件就明显地出现变形。

2）冷校直产生的内应力。一些刚性较差、容易变形的工件（如丝杠），通常采用冷校直的方法修正变形。

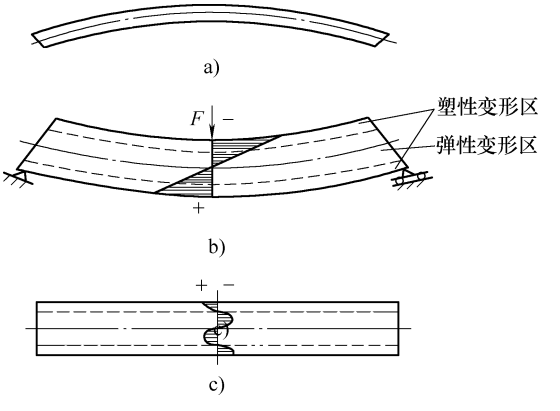


图 2-5-17　细长轴冷校直及校直后的内应力

图 2-5-17b 所示的工件中部受到载荷 F 的作用时，工件内部产生应力，其轴心线以上产生压应力，其轴心线以下产生拉伸应力，而且两条虚线之间为弹性变形区，虚线之外为塑性变性区。去掉外力后，工件的弹性恢复收到塑性变形区的阻碍，致使内应力重新分布如图 2-5-17c所示。由此可见，工件经冷校直后内部产生内应力，处于不稳定状态。

3）切削加工中产生的内应力。工件切削加工时，在各种力和热的作用下，各部分将产生不同程度的塑性变形及金相组织变化从而产生内应力，引起工件变形。

实践证明，在加工过程中切去表面一层金属后，所引起内应力重新分布，变形最为剧烈。因此粗加工后，应将被夹紧的工件松开使它有时间使内应力重新分布。否则，在继续加工时工件处于弹性应力状态下，而在加工完成后必然要逐渐产生变形，致使

破坏最终工序所得到的精度。图 2-5-18 所示为床身因内应力引起变形。

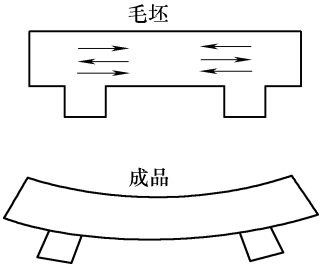


图 2-5-18　床身因内应力引起变形

3. 减少或消除工艺系统内应力的几种方法

1）对工件进行时效处理或热处理。通过对铸、锻、焊接件进行退火或回火，以及对淬火后进行回火，都可达到减少或消除内应力的目的。另外对床身、箱体等大部分铸铁件、焊接件在粗加工后进行时效处理（自然时效、人工时效或振动时效）。

2）合理设计零件结构。设计零件结构时，应注意简化零件结构，提高其刚性，减小壁厚差。焊接件的焊缝应均匀，以减少内应力。

3）合理安排工艺程序。将粗、精加工分开在不同的工序中进行，使粗加工后的工件有一定的时间使残余应力重新分布，以减小对精加工的影响。在加工大型工件时，粗、精加工往往在一道工序中来完成，这时应在粗加工后松开工件，让工件可以自由变形，再用较小的夹紧力夹紧工件后进行精加工。对于焊接件，在焊接前，工件必须经过预热处理以减小温差，减小内应力。对精度要求较高的零件，在粗加工后或半精加工后，安排一次时效处理或稳定化处理，以消除之前切削加工引起的内应力。

4）用热校直来代替冷校直，不但可提高工件的加工质量，而且可提高生产率。热校直是将工件在正火温度下用压力机对轴类零件进行校直。

第四节　工艺系统的热变形

一、工艺系统的热源及热平衡

在机械加工过程中，工艺系统在各种热源的影响下，常产生复杂的热变形，破坏了工件与刀具间相对的正确位置或使相对运动关系发生变化，从而产生加工误差。工艺系统的热变形对于精密加工、大型零件加工、数控加工，常常有举足轻重的影响。引起工艺系统受热变形的热源主要有两大类：内部热源（切削热和摩擦热）和外部热源（环境温度的变化和热辐射）。

1. 内部热源

1）切削热。切削热是由切削过程中切削层金属的弹性、塑性变形，刀具与工件、切屑间的摩擦所产生的。这些热量以不同形式及比例传给工件、刀具、夹具、切屑及周围介质。

2）摩擦热。摩擦热主要是由机床和液压系统运转时产生的，如电动机、轴承、齿轮等传动副、导轨副、液压泵、阀等运动部分产生的摩擦热。这些摩擦热将导致机床有关零件、部件的温度升高，其升温程度因相对热源位置不同而有所区别。即使同一个零件，其各部位的温升也可能有所不同。摩擦热是机床变形的主要热源。

2. 外部热源

1）环境温度。周围环境的温度随气温及昼夜温度的变化而变化，局部室温、空气对流、冷风、热风以及地基温度的变化等都会使工艺系统的温度发生变化，从而影响工件的加工精度。特别对于加工大型精密工件时，其影响更为明显。

2）热辐射。在加工过程中，阳光、照明、取暖设备等都产生辐射热，这种外来热源也会使工艺系统产生变形。

3. 热平衡状态

工艺系统受热源影响，温度逐渐升高，与此同时，其热量通过各种传导方式向周围散发。当单位时间内的热量传入与传出相等时，温度不再升高，这时工艺系统就达到热平衡状态。在热平衡状态下，工艺系统各部分的温度就保持在一个相对固定的数值上，因而各部分热变形也就相应地趋于稳定。图 2-5-19 所示为热平衡状态温度和时间曲线图。

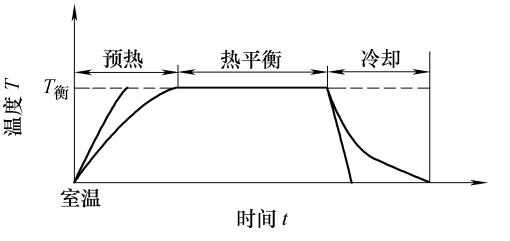


图 2-5-19　热平衡状态温度和时间曲线

二、工艺系统热变形对加工精度的影响

1. 机床热变形对加工精度的影响

机床在加工过程中，在内外热源的影响下，各部分温度将发生变化。由于热源分布得不均匀和机床结构的复杂性，机床各部件将发生不同程度的热变形，破坏了机床的几何精度，从而影响工件的加工精度。机床的热变形，最主要的是主轴箱部件、床身导轨以及两者相对位置等方面的热变形对加工精度的影响最大。

对于大型机床，如导轨磨床、外圆磨床、龙门式机床等长形床身部件，其温差影响是很显著的。另外，立柱和床鞍的位置也因床身的热变形而产生相应的变化。常见机床的热变形趋势如图 2-5-20 所示。

2. 工件热变形对加工精度的影响

工件主要受切削热影响而产生变形，对于大型工件或精密工件，外部热源也不可忽视，由于加工方法不同，不同的工件材料、结构和尺寸、工件的受热变形也不相同。

1）工件均匀受热。在车削、磨削轴、套、盘类零件的内、外圆中，当采用两顶尖装夹方法时，对于长度较长的工件受热后伸长量较大，受到顶尖的阻碍会出现压杆失稳的现象，这不但会使工件弯曲产生较大的误差，还有工件被甩出的隐患。这时宜采用弹性顶尖，或经常松开顶尖，以调整对工件的压力。

工件受热变形对粗加工似乎影响不大，但在数控机床上加工工件时，会给后续的加工工序带来影响。如工件没有充分冷却就进行精加工，则使冷却后测量的实际尺寸超差。

工件受热变形对精加工的影响较突出，特别是细长、高精度工件。例如磨削长度为 3m 的丝杠，一次走刀后工件温度升高 3℃，则丝杠伸长量为 0.1mm。

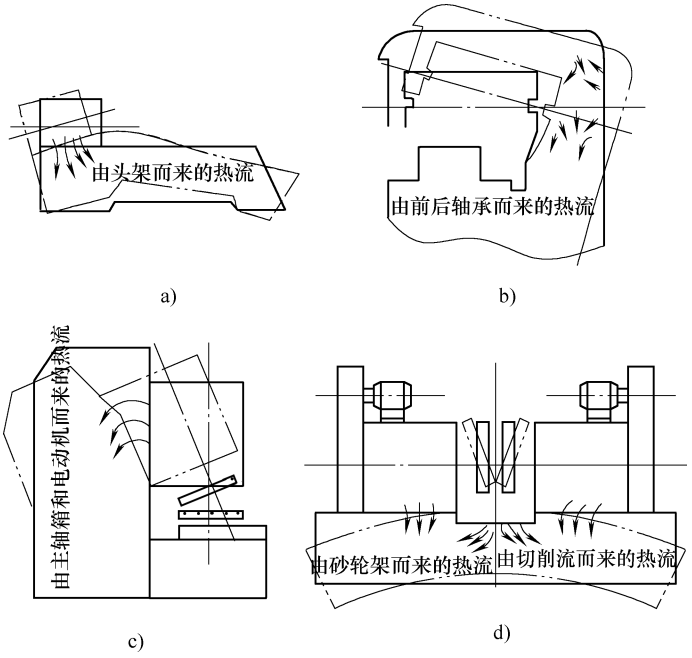


图 2-5-20　常见机床的热变趋势

a）车床　b）铣床　c）立式平面磨床　d）双端面铣床

2）工件不均匀受热。如铣、刨、磨平面时，工件单面受热，上、下两面的温度差使工件拱起，凸出部分随即被切（磨）去。而工件冷却后变形恢复，使工件出现中凹的形状误差。

3. 刀具热变形对加工精度的影响

刀具的热变形引起的加工误差。刀具的受热变形主要是由切削热引起的。虽然大部分的切削热都被切屑所带走，传给刀具的热量并不多，但因刀具体积小，热容量也小，而热量又集中，所以刀具切削表面通常会达到很高的温度。如高速钢车刀的切削刃部分温度可达到700℃左右，其受热伸长量可达0.03～0.05mm。因此，刀具的受热变形不可忽视。

连续切削时，刀具的受热变形开始时比较快，随后变得较缓慢，经过不长的时间便趋于热平衡状态。间断切削时，由于刀具有短时间的冷却，故其受热变形量比连续切削时要小一些，但其热变形的量不稳定，时大时小。

为了减小工件、刀具的受热变形，可通过合理选择刀具角度、切削用量，并使粗、精加工分开，采用切削液等方法降低切削热，保证加工精度。

三、减少和控制工艺系统热变形的主要途径

1. 减少发热，隔离热源

1）合理选择切削用量和刀具几何角度或粗、精加工分开进行，可以减少切削热。

2）从结构设计和加强润滑两方面采取措施，可改善摩擦特性以减少摩擦热。

3）尽可能将机床中能够分离的热源部件从主机中分离出去，如电动机、变速箱、液压系统、冷却系统等，这样也可以杜绝大部分的热源。

4）采取措施（如用隔热材料）将发热部件与机床大件（如床身、立柱等）隔离开来。

2. 强制性冷却

1）冷却。冷却是减少工件或刀具变形的最好办法。某些机床采用冷冻机对流经机床的润滑油和切削液进行强制冷却，以提高冷却效果。

2）风扇通风。加强通风散热，在热源处加风扇、散热片、通风窗口等。

3. 使用热补偿方法减少热变形

由于机床设计的问题，机床床身上各区的温度是高低不同的，对于高精度的机床，如磨床或数控机床类，就会对产品的加工产生不良的影响。为消除这种热变形的影响因素，将热量有意地从高温区导向低温区以补偿温度场的不均匀性。为防止滚珠丝杠的热变形常采用一种“预拉法”的措施，即在丝杠加工时故意将其螺距做得小一些，装配时对丝杠预先进行拉伸，使其螺距拉大到标准值。这样利用丝杠受拉力后产生的内应力来吸收热应力，从而补偿了丝杠的热变形。在装配上述机床时，用7848～9810N的预拉力使丝杠预伸长0.03～0.04mm，机床工作时效果很好。

4. 采取合理的机床部件结构减少热变形的影响

设计机床时，如果从结构上加以改进使热变形得到减少，这也是很重要的一个措施。注意结构的对称性就可以减少热变形，如在主轴箱的设计中将转动元件（轴、轴承及传动齿轮等）安放于对称位置，可以均衡箱壁的温升从而减少其变形。有些机床采用双立柱结构，由于左右对称，其在左右方向的热变形就比单立柱的结构要小得多。

在结构设计时，使关键部件的热变形只在无碍于加工精度的方向上产生，这也是从结构上解决热变形对加工精度影响的一个措施。

此外，在结构设计时为减少热变形的影响，还可以从选择材料上加以考虑。例如，对一些十分关键的零件，可采用线膨胀系数小的材料。

5. 控制环境温度

精密机床一般安装在恒温车间，其恒温误差一般控制在±1℃以内。

第五节　工艺尺寸链

尺寸链理论是机械制造工艺基础理论之一，它是在研究零件结构设计以及加工工艺和装配工艺中，对其各个尺寸及精度或误差之间的相互联系的规律和计算方法。

一、尺寸链的定义、组成及分类

1. 尺寸链的定义

在机械零件的设计、加工及机器装配过程中，一些互相关联、相互影响的尺寸组

合称作尺寸链。对尺寸链定义的理解应注意以下几点：

1）只有相关尺寸才能进入同一尺寸链。一个零件有许多尺寸，可以形成许多个尺寸链，属于同一尺寸链的尺寸，都是相互关联、相互影响的相关尺寸。如图 2-5-21 所示，阶梯轴尺寸 A_1、A_2、A_3 及 A_4 的任何变动，都会使未注尺寸 A_0 随之变化，它们是相关尺寸，共同形成一个尺寸链。而各轴颈尺寸 D_1、D_2、D_3 及 D_4 的变化与长度尺寸互不相关，因而它们也就不属于长度尺寸链。

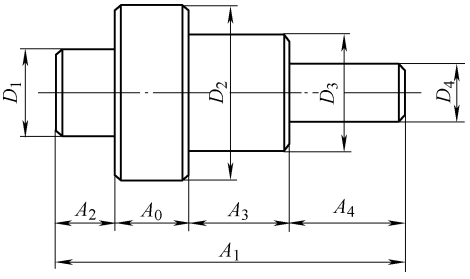


图 2-5-21　相关尺寸组成尺寸链

2）尺寸链必须包括图 2-5-21 中的未注明但确属相关的尺寸，包括其公称尺寸在内的相关尺寸。如图 2-5-21 中的长度尺寸链中，未注明尺寸 A_0 是在加工过程中，保证尺寸 $A_1 \sim A_4$ 的前提下最后得到的，所以长度尺寸链中必须包括尺寸 A_0，不可将它遗漏。

3）某些表面位置误差，有时也应进入尺寸链而成为相关尺寸。

2. 尺寸链的分类

1）根据相互关系的尺寸是同属一个零件或分属相互结合为一体的许多零件，尺寸链可分为零件尺寸链和装配尺寸链。图 2-5-22 所示为简单装配尺寸链。

2）按照尺寸的性质，可分为直线尺寸链和角度尺寸链。

由长度量尺寸构成的尺寸链称为直线尺寸链。

由角度量尺寸构成的尺寸链称为角度尺寸链。图 2-5-23 所示为角度尺寸链。

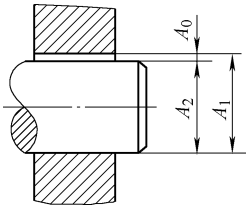


图 2-5-22　简单装配尺寸链

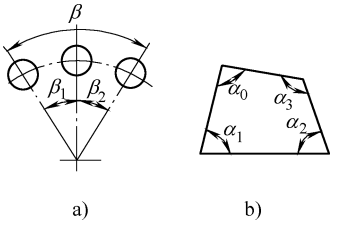


图 2-5-23　角度尺寸链

3）按照相关尺寸所占据的空间位置不同，尺寸链可分为平行尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链。

3. 尺寸链的组成部分

尺寸链的“环”：尺寸链内的每一个尺寸，都是尺寸链的“环”。尺寸链的环，按性质不同可分为封闭环和组成链两类。

1）尺寸链的封闭环。尺寸链内在加工（对零件尺寸链而言）或装配（对装配尺寸链而言）过程中，自然形成或最后得到的那一环，叫封闭环。图 2-5-21 所示的阶梯轴的未标注尺寸 A_0 和图 2-5-22 所示的轴孔配合的间隙值 A_0，都是封闭环。随着尺寸

注法和加工顺序的改变，封闭环并不是固定不变的。

2）尺寸链的组成环。尺寸链内除封闭环以外的所有各环都是组成环。

3）增环和减环。按照组成环尺寸变动时对封闭环的影响，可把组成环分为增环和减环。在其他尺寸不变的条件下，凡其尺寸增大时封闭环尺寸随之增大的称为增环，在公式中用符号$\vec{A}_i$表示；封闭环尺寸因而减小的称为减环，在公式中用符号$\overleftarrow{A}_i$表示。

如图 2-5-21 中的 A_1 是增环，A_2、A_3 及 A_4 均为减环。如图 2-5-22 中的 A_1 是增环，A_2 是减环。

为了迅速地确定尺寸链的组成环中哪些是增环，哪些是减环，可以采用下述方法：在尺寸链图上，先指定一个方向画箭头，然后沿此方向环绕尺寸链回路，依次给每一组成画出箭头，凡箭头方向和封闭环相反的为增环，相同的则为减环。

二、尺寸链的基本计算公式

尺寸链的环数较少，通常多采用极大极小法进行计算，此法优点是简便、可靠。常用基本计算公式如下。

1. 封闭环公称尺寸的计算公式

封闭环的公称尺寸等于所有增环公称尺寸之和减去所有减环公称尺寸之和，即

$$A_0 = \sum_{i=1}^{m} \vec{A}_i - \sum_{i-1}^{n} \overleftarrow{A}_i \tag{2-5-1}$$

式中　m——组成环中的增环数；

n——组成环中的减环数。

2. 封闭环极限尺寸的计算公式

封闭环的上极限尺寸等于各增环上极限尺寸之和减去各减环下极限尺寸之和；封闭环的下极限尺寸等于各增环下极限尺寸之和减去各减环上极限尺寸之和。即

$$A_{0\max} = \sum_{i=1}^{m} \vec{A}_{i\max} - \sum_{i=1}^{n} \overleftarrow{A}_{i\min} \tag{2-5-2}$$

$$A_{0\min} = \sum_{i=1}^{m} \vec{A}_{i\min} - \sum_{i=1}^{n} \overleftarrow{A}_{i\max} \tag{2-5-3}$$

式中　$A_{0\max}$——封闭环上极限尺寸；

$A_{0\min}$——封闭环下极限尺寸。

3. 封闭环上、下极限偏差计算公式

封闭环的上极限偏差等于各增环的上极限偏差之和减去各减环的下极限偏差之和；封闭环的下极限偏差等于各增环的下极限偏差之和减去各减环的上极限偏差之和。即

$$\mathrm{ES}(A_0) = \sum_{i=1}^{m} \mathrm{ES}(\vec{A}_i) - \sum_{i=1}^{n} \mathrm{EI}(\overleftarrow{A}_i) \tag{2-5-4}$$

$$\mathrm{EI}(A_0) = \sum_{i=1}^{m} \mathrm{EI}(\vec{A}_i) - \sum_{i=1}^{n} \mathrm{ES}(\overleftarrow{A}_i) \tag{2-5-5}$$

式中　$\mathrm{ES}(\vec{A}_i)$ ——各增环上极限偏差；

$EI(\vec{A}_i)$ ——各增环下极限偏差；

$ES(\overleftarrow{A}_i)$ ——各减环上极限偏差；

$EI(\overleftarrow{A}_i)$ ——各减环下极限偏差。

4. 封闭环的公差计算公式

封闭环的公差等于各组成环公差之和。即

$$T_0 = \sum_{i=1}^{m=n} T_i \tag{2-5-6}$$

式中 T_0——封闭环公差；

T_i——各组成环公差。

三、尺寸链计算的应用

零件加工过程是毛坯的形状和尺寸通过切削加工逐步向成品演变的过程。在这个过程中，各加工表面本身的尺寸，各表面之间的相互尺寸都在不断地发生变化，工艺基准根据各工序加工内容不同也不断地变化，因此需要进行工艺尺寸的换算。工艺尺寸的换算常用于以下几个方面：

1）测量基准和设计基准不重合的尺寸换算。

2）定位基准和设计基准不重合的尺寸换算。

3）需加工表面的工序尺寸换算。

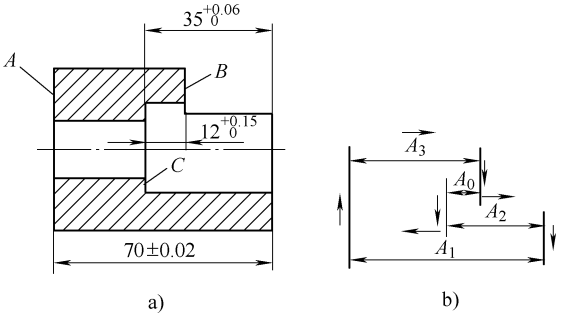


图 2-5-24 套筒简图

a）套筒简图 b）尺寸链图

例 1：如图 2-5-24 所示的套筒简图，直接测量 A、B 的尺寸以保证设计尺寸 A_0。由尺寸链图不难看出，当尺寸 A_3 定下后，尺寸 A_0 就自然形成，故 A_0 是封闭环，A_1、A_2 和 A_3 是组成环。A_2、A_3 为增环，A_1 为减环。

由式（2-5-1）求得公称尺寸

$$A_0 = (A_2 + A_3) - A_1$$

$$12\text{mm} = (35\text{mm} + A_3) - 70\text{mm}$$

$$A_3 = 47\text{mm}$$

由式（2-5-4）求得上极限偏差

$$0.15\text{mm} = [0.06\text{mm} + ES(A_3)] - (-0.02\text{mm})$$

$$ES(A_3) = +0.07\text{mm}$$

由式（2-5-5）求得下极限偏差

$$0 = [0 + EI(A_3)] - (+0.02\text{mm})$$

$$EI(A_3) = +0.02\text{mm}$$

最后求得　$A_3 = 47^{+0.07}_{+0.02}\text{mm}$

例 2：如图 2-5-25 所示的零件，当加工 C 面时，为使夹具结构简单和定位稳定可靠，选 A 面为定位基准，并用调整法根据对刀尺寸 A_2 加工 C 面，间接保证尺寸 A_0 的精度要求。由尺寸链图分析 A_0、A_1 和 A_2 之间的关系得出，A_1 为增环，A_2 为减环，A_0 为封闭环。

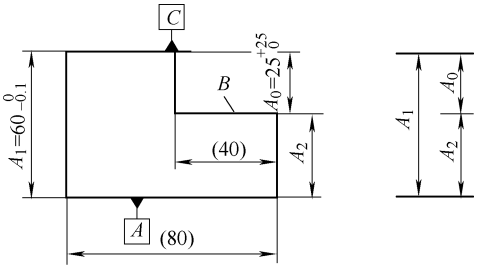


图 2-5-25　需要间接保证的尺寸计算

由式（2-5-1）求得公称尺寸

$$A_0 = A_1 - A_2$$
$$25\text{mm} = 60\text{mm} - A_2$$
$$A_2 = 35\text{mm}$$

由式（2-5-4）求得下极限偏差

$$0.25\text{mm} = 0 - EI(A_2)$$
$$EI(A_2) = -0.25\text{mm}$$

由式（2-5-5）求得上极限偏差

$$0 = -0.1\text{mm} - ES(A_2)$$
$$ES(A_2) = -0.1\text{mm}$$

最后求得　$A_2 = 35^{-0.1}_{-0.25}\text{mm}$

第六节　加 工 精 度

一、加工精度基本概念

加工精度是指零件经过机械加工后所得实际几何参数（尺寸、形状和位置）与理想几何参数相符合的程度。无论是用试切法加工一个零件，还是用调整法加工一批零件，加工后可能会发现有零件在某些尺寸、形状或位置方面与理想零件有所不同，它们之间的差值分别称为尺寸、形状或位置误差，即加工误差。零件经加工后的实际几何参数与其理想几何参数的偏离程度称为加工误差。加工中加工误差越小则加工精度

越高，加工误差大则加工精度越低。加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度三个方面。

1）尺寸精度。指加工后零件的实际尺寸与零件的设计尺寸相符合的程度。

2）形状精度。指加工后零件的表面实际几何形状与理想的几何相符合的程度。

3）位置精度。指加工后零件有关表面之间实际位置与理想位置相符合的程度。

二、获得加工精度的方法

1. 获得尺寸精度的方法

1）试切法。通过试切—测量—调整—再试切，反复进行直到被加工尺寸达到要求为止的加工方法。

2）调整法。预先用样板、样件或根据工件来调整好刀具和工件在机床上的相对位置。

3）定尺寸刀具法。用一定形状和尺寸的刀具（或组合刀具）来保证被加工部位尺寸的加工形状的尺寸精度。

4）自动测量法。该方法常应用于由测量装置、进给装置和控制系统组成的自动控制加工系统中，具体方法有：自动测量、自动停车和数字控制。

2. 获得形状精度的方法

1）轨迹法。轨迹法是指依靠刀具运动轨迹来获得所需要工件形状的方法。

2）成形法。成形法是使用成形刀具加工，获得工件表面的方法。

3）展成法。在加工时刀具和工件做展成运动，在展成运动过程中切削刃包络出被加工表面的形状，称为展成法。

3. 获得位置精度的方法

获得位置精度的方法有两种：一是根据工件加工过的表面进行找正；二是用夹具装夹工件，工件的位置精度由夹具来保证。

三、原始误差

在机械加工中，零件的尺寸、几何形状和表面间的相互位置的形成，取决于工件和刀具在切削运动过程中相互位置的关系。工件和刀具安装在夹具和机床上，并受到夹具和机床的约束。因此，在机械加工时，机床、夹具、刀具和工件构成一个系统，叫做机械加工工艺系统。由于工艺系统受到多方面因素影响，产生各种各样的误差，称为原始误差。在零件加工中，造成加工的主要原始误差可分为如下两个方面，即工艺系统的原有误差（几何误差）和加工过程中的原始误差（动态误差）。

1. 工艺系统的原有误差（几何误差）

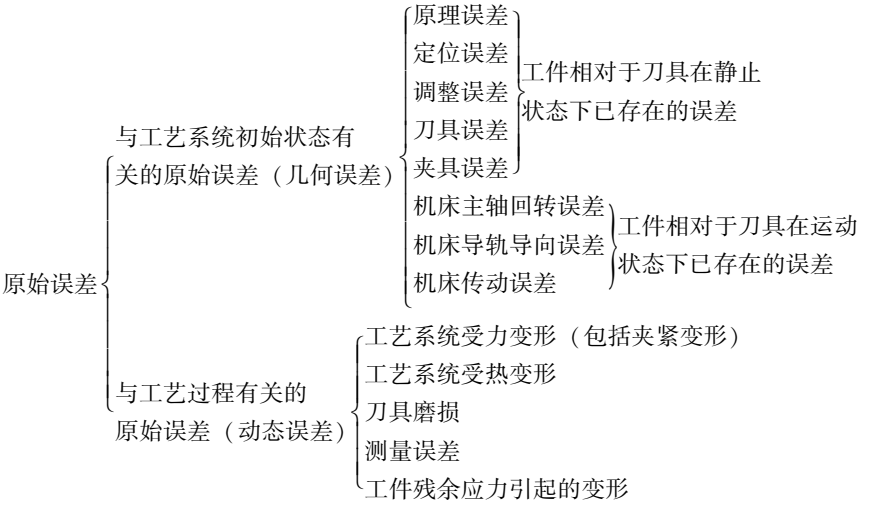
在零件未进行正式切削加工以前，加工方法本身就存在加工原理误差或机床、夹具、刀具、量具和工件所组成工艺系统本身就存在着某些误差。

2. 加工过程中的原始误差（动态误差）

在零件的加工过程中，力、热和磨损等因素的影响将破坏工艺系统的原有精度，

使工艺系统有关组成部分产生新的附加的原始误差，从而进一步造成加工误差。加工过程中造成原始误差的因素，主要有工艺系统的受力变形、工艺系统热变形、工艺系统磨损和工艺系统残余应力等。

3. 原始误差分类



四、加工原理误差

加工原理误差是由于采用了近似的成形运动轨迹、近似速比的成形运动或近似的刀具轮廓加工零件所产生的误差。因为它是在加工原理上存在的误差，所以称为加工原理误差。

1）近似的成形运动轨迹引起的误差。当在数控机床上加工曲面时，由于计算机发出的指令只能使工作台做数值很小的直线进给运动，用直线去逼近所需加工的曲面时，所产生的插补误差。

2）近似速比的成形运动引起的误差。

3）近似的刀具轮廓引起的误差。

五、提高加工精度的工艺措施

在机械加工过程中，工艺系统存在各种原始误差，这些原始误差在不同的具体条件下以不同的程度反映为零件的加工误差。为保证和提高机械加工精度，可通过直接控制原始误差或控制原始误差对零件加工精度的影响来达到，其主要途径有：减小或消除原始误差，补偿或抵消原始误差，转移原始误差和分化或均化原始误差等。

1）减小或消除原始误差法。提高零件加工时所使用的机床、夹具、量具及工具的精度，以及控制工艺系统受力、受热变形等。

2）补偿或抵消原始误差法。对工艺系统中的一些原始误差若无适当措施使其减少

时，则可采取补偿或抵消误差的办法消除其对加工精度的影响。

3）分化或均化原始误差法。为提高一批零件的加工精度可采用分化某些原始误差的方法。对加工精度要求很高的零件，还可以采取不断试切或逐步均化加工前工件原有的原始误差的方法。

4）转移原始误差法。对工艺系统的原始误差，在一定的条件下可以使其转移到加工误差的非敏感方向或其他不影响加工精度的方法。这样，在不减少原始误差的情况下，同样可以获得较高的加工精度。

第七节　机械加工表面质量

一、加工表面质量的含义

机械加工表面质量，是指零件在机械加工后表面层的微观几何形状误差和物理、化学及力学性能。机械加工后的零件表面并不是理想的光滑表面，存在着不同程度的表面粗糙度、表面波纹度及表面层的物理机械性能等表面缺陷。虽然是极薄的一层，但对零件的使用性能，如疲劳强度、耐磨性、耐腐蚀性和配合性质等都有很大影响。

1. 加工表面的几何形状误差

加工表面的几何形状误差，包括如下三个方面，如图 2-5-26 所示。

1）表面粗糙度。表面粗糙度是指已加工表面的微观几何形状误差，其波长与波高比值一般小于 50。表面粗糙度指标有 *Ra* 和 *Rz*，并优先使用 *Ra*。表面粗糙度通常是由机械加工中切削刀具的运动轨迹所形成的，如图 2-5-27 的表面粗糙度所示。

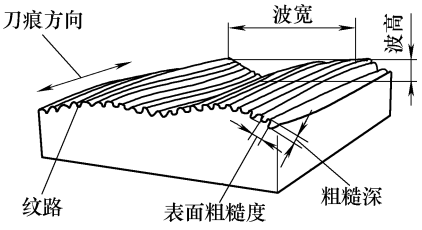


图 2-5-26　加工表面的几何形状误差

2）表面波纹度。表面波纹度是介于宏观几何形状误差（形）与表面粗糙度之间的周期

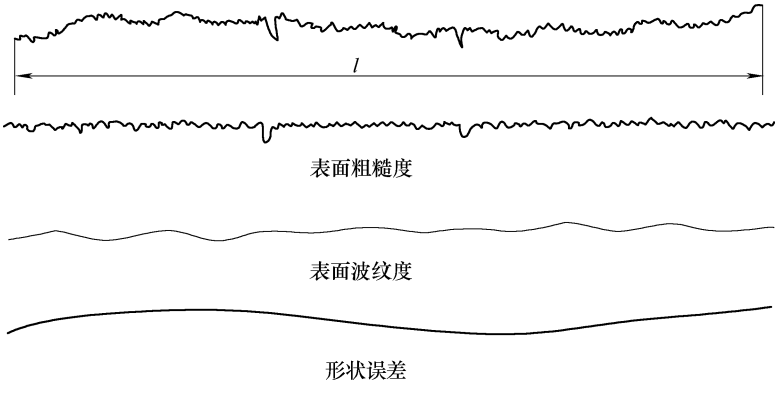


图 2-5-27　工件的表面质量

性几何形状误差，如图2-5-27的表面波纹度所示。表面波纹度通常是由于加工过程中工艺系统的低频振动所造成的。

一般情况下，波距/波高＜50为表面粗糙度，波距/波高＝50～1000时为表面波纹度，波距/波高＞1000时为宏观的形状误差。

3）纹理方向。纹理方向是指表面刀纹的方向，它取决于表面形成过程中所采用的加工方法。

2. 加工表面层的物理机械性能

由于机械加工中力的因素和热的因素的综合作用，工件的加工表面层的物理机械性能将发生一定的变化。主要有以下三个方面：

1）表面层金属的冷作硬化。由于机械加工时工件表层金属受到切削力的作用，产生较大的塑性变形，使金属的晶格间剪切滑移，晶格严重扭曲、拉长，甚至被破坏，使金属表面层硬度提高，塑性降低，物理力学性能发生变化。这种现象称作冷作硬化。切削力大，塑性变形大，硬化程度加强；塑性变形速度快，变形不充分，硬化程度弱。另外，机械加工中产生的切削热，提高了表面层的温度，使已强化的金属产生回复现象，使金属失去加工硬化中所得到的物理力学性能，这种现象称作软化。切削温度高，持续时间长，回复作用也大。因此，机械加工时表面层的冷作硬化就是硬化和回复作用的综合结果。

2）表面层的金相组织的变化。机械加工过程中由于切削热的作用，加工表面层产生金相组织的变化，改变了表面层的材质。

3）表面层残余应力。机械加工过程中，表层金属组织发生冷态塑性变形、热态塑性变形和金相组织的变化，使表层金属与基体间产生相互平衡的残余应力。工件经机械加工后，其表面层都存在残余应力。残余应力会引起工件变形，失去原有精度。残余应力为拉伸应力时，使疲劳裂纹增加，耐蚀性下降；残余应力是压应力时，则使疲劳强度及耐磨性提高。

二、加工表面质量对零件使用性能的影响

1. 表面质量对零件耐磨性的影响

零件的耐磨性取决于两摩擦件的材料和润滑条件，当零件的材料和润滑条件确定后，零件的表面质量对零件的耐磨性的影响就起着主导作用，包括表面粗糙度对零件耐磨性的影响和表面层加工硬化对零件耐磨性的影响。

2. 表面质量对零件疲劳强度的影响

表面对零件疲劳强度的影响，包括表面粗糙度对零件疲劳强度的影响和残余应力、加工硬化对零件疲劳强度的影响。承受交变载荷的零件，表面粗糙、有划痕及裂纹，容易引起应力集中，使零件产生疲劳损坏。为了提高零件的疲劳强度，对零件的轴肩、沟槽等拐角处的应力集中区，用精磨、抛光、滚压等加工方法提高表面质量。适度的表面层冷作硬化可提高零件的表面硬度和耐磨性，阻止表面已有裂纹的扩散和防止疲劳裂纹的产生。但是，冷作硬化程度与硬化层深度过大，容易使零件表面产生微裂纹

甚至表层剥落。表面层的残余应力状态对零件的疲劳强度也有影响，压应力能抵消部分工作载荷引起的拉伸应力，延缓疲劳裂纹的产生和扩散。

3. 表面质量对零件耐腐蚀性的影响

金属腐蚀是化学过程和电化学过程引起的。金属表面越粗糙，表面微小裂纹越多，腐蚀性气体或液体越容易积存，使其表面腐蚀加速。所以经精密加工后的表面质量提高，不易腐蚀。

4. 表面质量对零件配合精度的影响

表面粗糙度会影响配合性质的稳定性。间隙配合，接触表面的峰顶在初始期工作中很快磨损，使间隙加大，降低配合精度。过渡配合，使配合变松。过盈配合，装配时装配表面被压平使有效过盈量减小，降低联结强度。

三、影响加工表面质量的因素

1. 影响加工表面粗糙度的因素

1）与切削刀具有关，包括刀具的几何参数、材料。

2）切削用量有关，包括进给量、切削速度和切削深度。

3）与工件材料有关。包括材料的品种、成分、性质及热处理情况。

4）与工件加工时的冷却及润滑条件有关。

5）与工艺系统的振动有关。工艺系统的振动是切削过程中经常发生的现象，不可能完全消失。根据其产生的原因可分为自激振动、受迫振动和自由振动。

2. 影响加工表面层的物理机械性能的因素

（1）影响加工表面冷作硬化的因素

1）刀具。刀具前角越大，切削层金属的塑性变形越小，硬化层深度越小；切削刃刃口圆弧越大，已加工表面在形成过程中受挤压越大，加工硬化程度就越大；随着刀具后刀面磨损量的增加，后刀面与已加工表面的摩擦也随之增加，硬化层深度也增大。

2）工件材料。工件材料的塑性越大，硬度越低，加工表面层的硬化越严重。

3）切削用量。当进给量增大时，切削力增大，表面层的金属塑性变形加剧，硬化程度增加。当切削深度较小时，表面层的金属硬化程度不仅不会减小，反而增加。当切削速度增加时，塑性变形不充分，硬化层深度减小。如果切削速度很高，导致回复来不及进行，硬化层深度增加。

（2）影响加工表面残余应力的因素

1）切削力引起的残余应力。

2）热效应引起的残余应力。

3）金相组织变化引起体积变化而产生残余应力。

第六章
刀 具 知 识

第一节　刀具的切削原理

金属的切削加工是用切削刀具把工件毛坯上预留的金属材料（统称余量）切除。要实现这一切削过程，必须具有以下三个条件：第一，工件与刀具之间要有相对运动，即切削运动；第二，刀具必须具有合理的几何参数，即切削角度等；第三，刀具材料必须具备一定的切削性能。

一、切削运动和切削用量

1. 切削运动（图 2-6-1）

（1）主运动　主运动是由机器或人力提供的主要运动，它使刀具和工件之间产生相对运动，从而使刀具前刀面接近工件并切除切削层。在加工中心等设备中，主运动是指主轴的旋转运动。

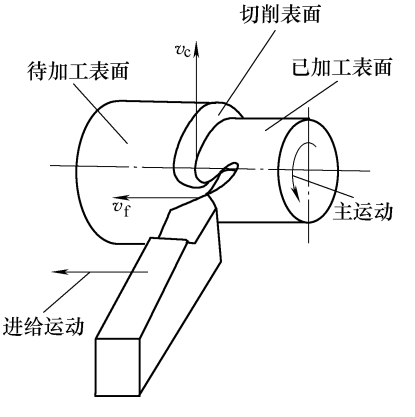


图 2-6-1　切削运动

（2）进给运动　进给运动是由机床或人力提供的使刀具与工件间产生附加的相对运动，加上主运动，即可连续地切除切削层，并得出具有所需几何特性的已加工表面。在加工中心等设备中，进给运动是指各轴伺服电动机带动的各部件的运动（v_f）。

（3）合成切削运动　当主运动和进给运动同时进行时，由主运动和进给运动合成的运动称为合成运动。刀具切削刃上选定点相对工件的瞬时合成运动方向称为合成切削运动方向，其速度称为合成切削速度。合成切削速度 v_e 等于主运动速度 v_c 和进给运动速度 v_f 的矢量和 $\boldsymbol{v}_e = \boldsymbol{v}_c + \boldsymbol{v}_f$。

（4）辅助运动　除主运动、进给运动以外，机床在加工过程中还需要完成一系列

其他的运动，即辅助运动。辅助运动的种类很多，其中包括：刀具接近工件、切入、切出工件、快速返回原点的运动；为使刀具与工件保持相对正确位置的对刀运动；多工位工作台和多工位刀架的周期换位以及逐一加工多个相同局部表面时，卧式加工中心的 B 轴旋转分度运动；加工中心刀库更换刀具等。另外，机床的起动、停机、变速、换向以及部件和工件的夹紧、松开等的操纵控制运动，也属于辅助运动。

2. 工件表面（图 2-6-2）

切削加工过程中，工件上会形成三个不断变化着的表面。

待加工表面：工件上有待切削的表面。

已加工表面：工件上经刀具切削后形成的表面。

加工表面：工件上切削刃正在切削的表面，它是待加工表面和已加工表面之间的过渡部位。

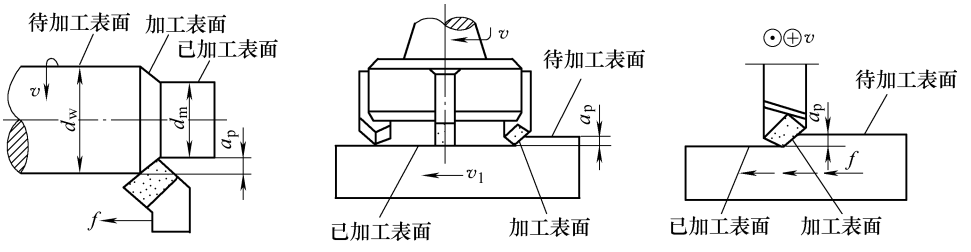


图 2-6-2　工件表面

3. 切削用量

切削用量是切削时各运动参数的总称，可用它对主运动和进给运动进行定量描述。切削用量三要素包括切削速度、进给量和背吃刀量（图 2-6-3）。

（1）切削速度（v_c）　切削刃上选定点相对于工件主运动的瞬时线速度。加工中心的主轴上刀具的线速度 v_c（m/min）的计算公式　$v_c = n\pi d/1000$

式中　n——工件或刀具的转速（r/min）；

d——切削刃上选定出所对应的工件或刀具的回转直径（mm）。

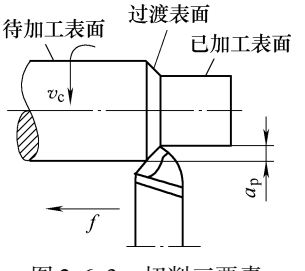


图 2-6-3　切削三要素

（2）进给量（f）　刀具在进给运动方向上相对于工件的位移量，称为进给量。用刀具或工件每转或每行程的位移量 f（mm/r）来表示。其单位用 mm/r 或 mm/行程（如刨削等）表示。

加工中心编程时，通常采用进给速度 v_f（F 指令）表示刀具与工件的相对运动速度，单位 mm/min（通常称作分钟进给速度）；车削时的进给速度 v_f 为 $v_f = n_f$，当然用 mm/r（通常称为转进给）也是很多的，使用转进给在计算铣刀、铰刀等多齿刀具时便于计算每个刀齿相对于工件在进给运动方向上的位移量，即每齿进给量，公式为

$$v_f = nZf_Z$$

式中　Z——刀具齿数；

f_Z——每齿进给量。

（3）背吃刀量（a_p）　已加工表面与待加工表面之间的垂直距离，称为背吃刀量（mm）。外圆车削时

$$a_p = (d_w - d_m)/2$$

式中　d_w——待加工表面直径（mm）；

d_m——已加工表面直径（mm）。

车内孔或镗孔时，$a_p = (d_m - d_w)/2$，铣削时就是已加工表面到未加工表面的垂直距离，钻孔时就是钻头半径尺寸。

二、刀具的几何参数

金属切削刀具的种类繁多，形状各异，但切削部分的几何特征都具有共性，各种刀具切削部分的基本形态都与外圆车刀的相似。所以其他刀具的几何参数都可以使用外圆车刀的几何参数（图2-6-4）进行换算。因此本节以外圆车刀作为基准来定义各类刀具的几何参数。

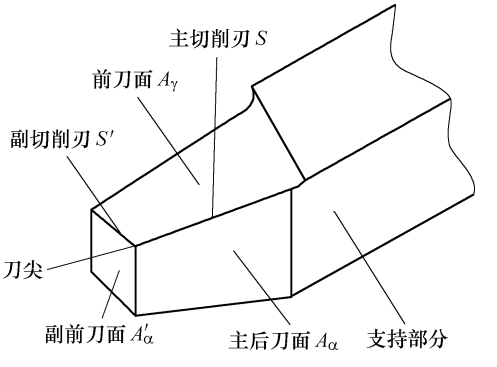


图2-6-4　外圆车刀的几何参数

1. 外圆车刀切削部分的组成要素

1）前刀面（A_γ）：切屑流过的表面。

2）主后刀面（A_α）：与过渡表面相对的表面。

3）副后刀面（A'_α）：与已加工表面相对的表面。

4）主切削刃（S）：前刀面与主后刀面的交线，担负主要切削工作。

5）副切削刃（S'）：前刀面与副后刀面相交得到的刃边。

6）刀尖：主、副切削刃连接处的一小部分切削刃称为“刀尖”。

2. 外圆车刀切削部分的几何角度

为了确定车刀切削部分各表面在空间倾斜相交的状态，即标注车刀的角度，必须建立由三个坐标平面组成的参考系。用于确定刀具几何角度的参考系有两类：一类称为刀具静止参考系，是用于定义刀具在设计、制造、刃磨和测量时刀具几何参数的参考系，在刀具静止参考系中定义的角度称刀具标注角度（或刀具的刃磨角度）。另一类称为刀具工作参考系，是规定刀具进行切削加工时几何参数的参考系。该参考系考虑了切削运动和实际安装情况对刀具几何参数的影响，在这个参考系中定义和测量的刀具角度称为工作角度。

1）下面介绍ISO标准所推荐的正交平面参考系、法平面参考系和假定工作平面参考系。本着实用的原则，本节在外圆车刀的刀具角度定义中仅对常用的外圆车刀的标注角度（刃磨角度）进行详细的描述。正交平面参考系的三个坐标平面为基面（p_r）、切削平面（p_s）和正交平面（p_o）。

① 基面（p_r）。基面就是通过切削刃选定点并平行或垂直于刀具安装平面或定位平面的一个平面或轴线。一般说来，其方位要垂直于假定的主运动方向。对车刀、刨刀而言，就是过切削刃选定点并与刀柄安装面平行的平面。对钻头、铣刀等旋转类刀具来说，即过切削刃选定点并通过刀具轴线的平面。

② 切削平面（p_s）。切削平面就是通过切削刃选定点与切削刃相切并垂直于基面的平面。当切削刃为直线刃时，过切削刃选定的切削平面，即包含切削刃并垂直于基面的平面。对应于主切削刃和副切削刃的切削平面分别称为主切削平面（p_s）和副切削平面（p_s'）。

③ 正交平面（p_o）。正交平面是指通过切削刃选定点并同时垂直于基面和切削平面的平面。也可看成是通过切削刃选定点并垂直于切削刃在基面上投影的平面。

④ 法平面（p_n）。法平面是指通过切削刃选定点垂直于主切削刃的平面。

⑤ 假定工作平面（p_f）。假定工作平面是通过切削刃选定点垂直于基面（p_r）的平面，一般来说其方位要平行于假定的进给运动方向。

⑥ 背平面（p_p）。背平面是指通过切削刃选定点，并垂直于基面（p_r）和假定工作平面（p_f）的平面。

图 2-6-5 所示为刀具静止参考系中各基准坐标平面与刀具前刀面、后刀面及切削刃相互位置关系的立体图。

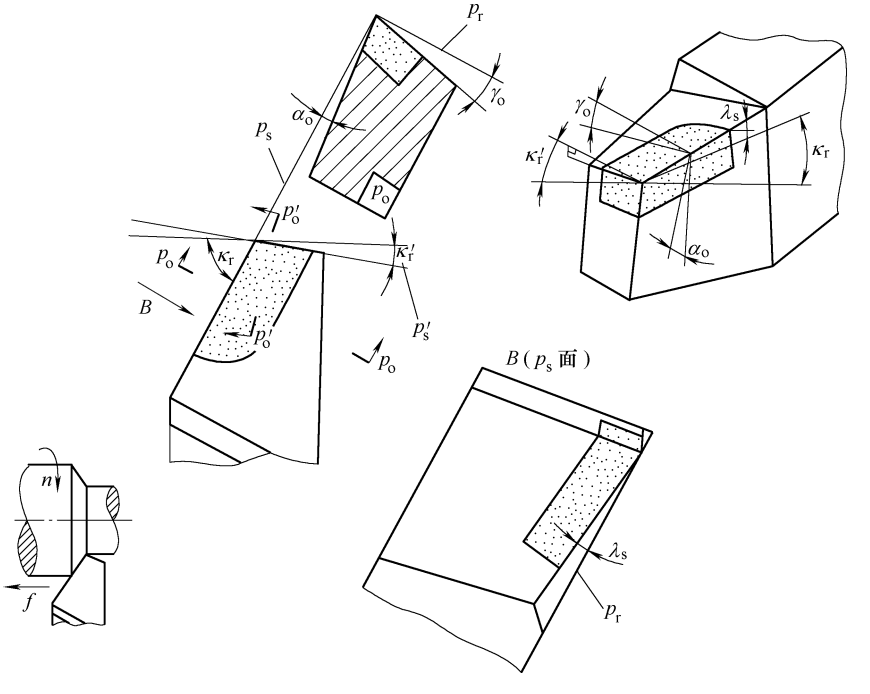


图 2-6-5　刀具静止参考系

2）刀具的标注角度。在正交平面中测量的角度有前角、后角和楔角，在切削平面

中测量的角度有刃倾角，在基面中测量的角度有主偏角、副偏角和刀尖角。不同角度的车刀如图 2-6-6 所示。

① 前角（γ_o）。前角是前刀面（A_γ）与基面（p_r）之间的夹角，其大小影响刀具的削性能。当前刀面与切削平面夹角小于90°时，前角为正值；大于90°时，前角为负值。

② 后角（α_o）。后角是后刀面（A_α）与切削平面（p_s）间的夹角，其作用是减小后刀面与过渡表面之间的摩擦。当后刀面与基面夹角小于 90°时，后角为正值；大于90°时，后角为负值。

③ 楔角（β_o）。楔角是前刀面（A_γ）与后刀面（A_α）间的夹角，反映刀体强度和散热能力大小。它是由前角 γ_o 和后角 α_o 得到的派生角度

$$\beta_o = 90° - (\gamma_o + \alpha_o)$$

④ 刃倾角（λ_s）。刃倾角是主切削与基面 p_r 间的夹角，在 B 向视图中才能表示清楚。当刀尖相对车刀刀柄安装面处于最高点时，刃倾角为正值；刀尖处于最低点时，刃倾角为负值，如图 2-6-5B 向视图所示。当切削刃平行于刀柄安装面时，刃倾角为0°，这时切削刃在基面内。

⑤ 主偏角（κ_r）。主偏角是主切削平面 p_s 与假定工作平面 p_f 间的夹角。

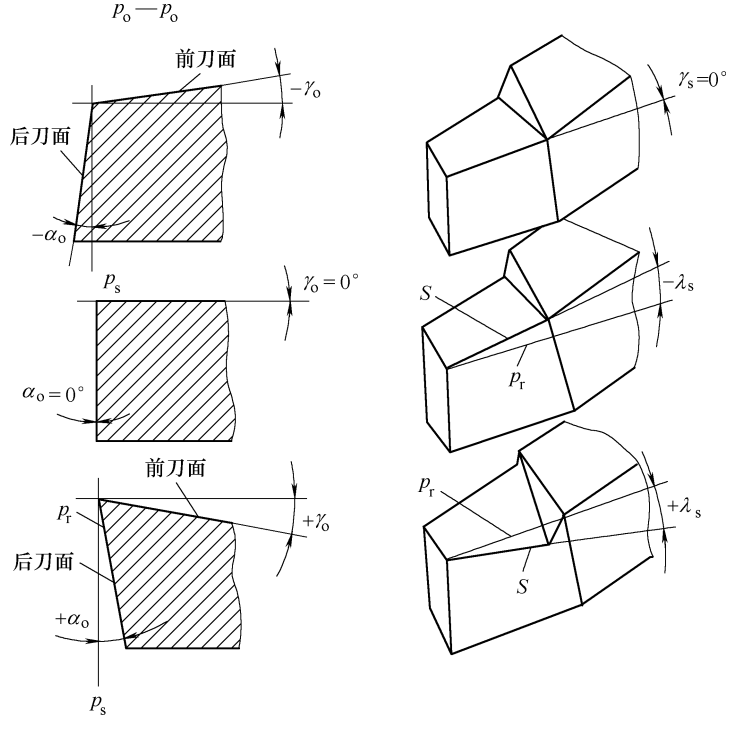


图 2-6-6　不同角度的车刀

⑥ 副偏角（κ_r'）。副偏角是副切削平面 p_s'与假定工作平面 p_f 间的夹角。

⑦ 刀尖角（ε_r）。刀尖角是主切削平面 p_s 与副切削平面 p_s'间的夹角，它是主偏角

κ_r 和副偏角 κ_r' 计算得到的派生角度

$$\varepsilon_r = 180° - (\kappa_r + \kappa_r')$$

三、金属切削过程的基本理论及规律

1. 切削过程中的形变，切削时的三个形变区

金属切削的过程实质上是被切削金属层在刀具偏挤压作用下产生剪切滑移的塑性变形过程。通常将切削过程的塑性变形划分为三个变形区，如图 2-6-7a 所示。

（1）第Ⅰ形变区——剪切变形区　被切削金属层在刀具前刀面的挤压力作用下，首先产生弹性变形，当最大剪应力达到材料的屈服极限时，工件材料沿 *OA* 曲线（图 2-6-7b）发生剪切滑移。随着刀具前刀面的逐渐趋近，塑性变形逐渐增大，并伴随有变形强化，直至 *OM* 曲线滑移终止，被切削金属层与母体脱离成为切屑沿前刀面流出，以及随之产生的加工硬化。第Ⅰ变形区消耗大部分的功率并产生大量的切削热。图 2-6-7b 中的 *OAMO* 所包围的区域是剪切变形区，即图 2-6-7a 所示的第Ⅰ变形区。

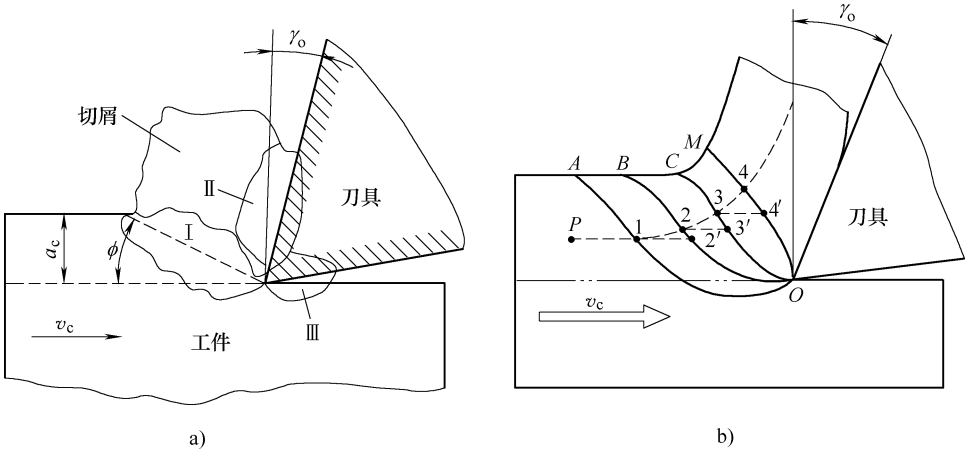


图 2-6-7　刀具切削剪切变形区

（2）第Ⅱ变形区——挤压摩擦变形区　切屑沿前刀面排出时，进一步受到前刀面的挤压而产生剧烈摩擦，使靠近前刀面的金属纤维化，基本上和前刀面平行。

（3）第Ⅲ变形区　已加工表面和过渡表面受到切削刃钝圆部分和后刀面的挤压、摩擦而产生塑性变形的区域，造成表层金属的纤维化和加工硬化，并产生比较集中、复杂的应力。第Ⅲ变形区影响工件的表面质量和使用性能。

2. 切屑的种类

不同工件材料，不同切削条件，切削过程中的变形程度也就不同，从而形成不同的切屑。根据切削过程中变形程度的不同，可把切屑分为四种不同的类型，如图 2-6-8 所示。

1）带状切屑。带状切屑的底层光滑，上表面呈毛茸状，无明显裂纹。当切削加工软钢、铜、铝和可锻铸铁等塑性金属材料时，在切削深度较小、切削速度较高、刀具

有比较大的前角时，容易得到这种切屑。形成带状切屑时，切削过程较平稳，切削力波动较小，已加工表面的表面粗糙度值较小。

2）节状切屑。节状切屑又称作挤裂切屑。这种切屑的底面有时会出现裂纹，上表面呈明显的锯齿状。节状切屑多出现在加工塑性较低的金属材料（如黄铜）上，当切削速度较低、切削深度较大、刀具前角较小时常出现节状切屑；当工艺系统刚性不足、加工碳素钢材料时，也容易得到这种切屑。产生挤裂切屑时，切削过程不太稳定，切削力波动也较大，已加工表面的表面粗糙度值较大。

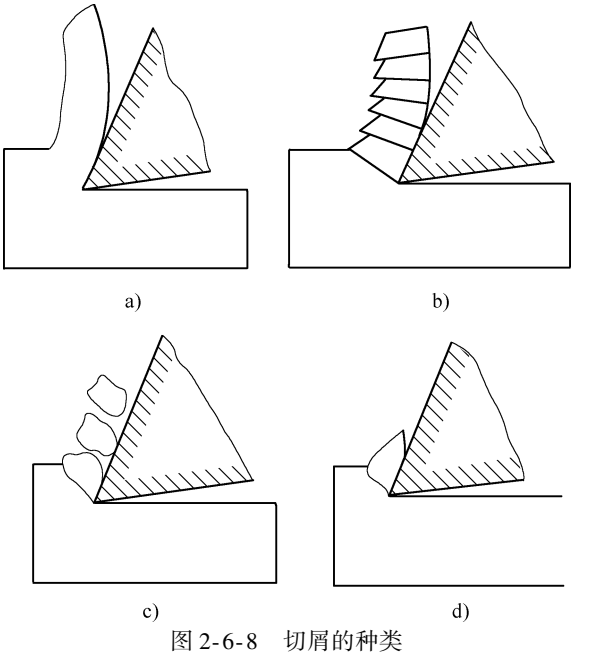


图 2-6-8　切屑的种类

a）带状切屑　b）节状切屑　c）粒状切屑　d）崩碎切屑

3）粒状切屑。粒状切屑又称单元切屑。采用小前角或负前角，以极低的切削速度和大的切削深度切削塑性金属时，会产生这种切屑。产生单元切屑时，切削过程不平稳，切削力波动较大，已加工表面的表面粗糙度值较大。

4）崩碎切屑。切削脆金属（铸铁、青铜等）时，由于材料的塑性很小，拉伸强度很低，在切削时切削层内靠近切削刃和前刀面的局部金属未经明显的塑性变形就被挤裂，形成不规则状的碎块切屑。工件材料越硬、刀具前角越小、切削深度越大时，越容易产生崩碎切屑。产生崩碎切屑时，切削力波动大，加工表面凹凸不平，切削刃容易损坏。切削力和切削热集中作用在切削刃处。

3. 积屑瘤与鳞刺

（1）积屑瘤　切削塑性金属材料时，由于工件材料是被挤裂的，因此切屑对刀具的前刀面产生很大的压力，并摩擦生成大量的切削热。在这种高温高压下，与刀具前刀面接触的那一部分切屑由于摩擦力的影响，流动速度相对减慢，形成“滞留层”。当摩擦力一旦大于材料内部晶格之间的结合力时，滞留层中的一些材料就会粘附在切削刃口附近形成一种硬度很高（通常为加工材料硬度的 2 ~ 3.5 倍）的楔状金属块，它包围着切削刃且覆盖部分前刀面，这种楔状金属块称为积屑瘤，如图 2-6-9 所示。

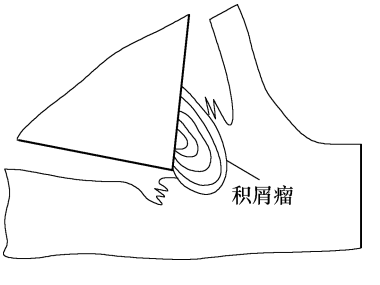


图 2-6-9　积屑瘤

1）优点：积屑瘤的硬度比原材料的硬度要高，

可代替切削刃进行切削，提高了切削刃的耐磨性；同时积屑瘤的存在使得刀具的实际前角变大，刀具变得较锋利。

2）缺点：积屑瘤的存在，实际上是一个形成、脱落、再形成、再脱落的过程；部分脱落的积屑瘤会粘附在工件表面上；而刀具刀尖的实际位置也会随着积屑瘤的变化而改变；同时，由于积屑瘤很难形成较锋利的切削刃，在加工中会产生一定的振动。所以这样加工后所得到的工件表面质量和尺寸精度都会受到影响。

3）积屑瘤的成因很多。这些因素主要有工件材料、切削速度、切削液、刀具表面质量、刀具前角以及刀具材料等切削条件。工件材料塑性高、强度低时，切屑与前刀面摩擦大，切屑变形大，容易粘刀而产生积屑瘤，而且积屑瘤尺寸也较大。切削脆性金属材料时，切屑呈崩碎状，刀和切屑接触长度较短，摩擦力小，切屑温度低，一般不易产生积屑瘤。

4）积屑瘤的抑制措施。

① 切屑速度应适当。切削速度是通过切削温度对前刀面的最大摩擦系数和工件材料性质的影响而影响积屑瘤的产生，控制切削速度使切削温度控制在300℃以下或500℃以上，就可以减少积屑瘤的生成，所以具体加工中采用低速或高速切削都是抑制积屑瘤产生的措施。

② 适当增大前角。前角越大，刀具相对越锋利，切屑变形减小，则切削力减小，且刀面的摩擦力减小，从而减小了积屑瘤生成的条件。实践证明，前角增大到35°时，一般不产生积屑瘤。

③ 进给量增大，则切削深度增加，刀具与切屑的接触长度增加，易于形成积屑瘤。若适当降低进给量，则可减小积屑瘤产生的可能性。

④ 采用润滑性能良好的切削液也可以减少或防止积屑瘤的产生。

（2）鳞刺　鳞刺是指已加工表面出现的鳞片状反刺，如图2-6-10所示，它是以较低切削速度切削塑性金属时常出现的一种现象，使已加工表面质量恶化，表面粗糙度值增大。在加工中心加工工件时可通过改变刀具几何角度，增大前角并保持刃口锋利及采用涂层刀片等方法减少鳞刺的产生。

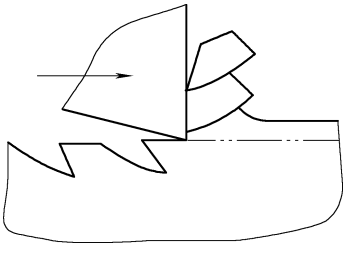


图2-6-10　鳞刺

4. 加工硬化

（1）加工硬化产生的原因　切削时在已加工表面层内也会产生不同程度的塑性变形，严重的变形会改变被切削材料的加工性能。

任何刀具的切削刃都不可能磨得绝对锋利，当在钝圆弧切削刃及其邻近的后刀面的切削、挤压和摩擦作用下，使已加工表面的金属晶粒产生扭曲、挤压和破碎，如图2-6-11所示，这种因严重的塑性变形而使表面层硬度增高的现象称为加工硬化，又称冷作硬化。金属材料经硬化后提高了屈服强度，并在已加工表面上出现显微裂纹和残余应力，降低材料疲劳强度。

（2）影响加工硬化的因素

1）增大刀具的前角、减小刀具钝圆的半径，切削层金属的塑性变形减小，从而减小了工件的加工硬化程度。

2）工件材料的塑性越大，强化指数越大，则硬化越严重。对于一般碳素结构钢，碳含量越少，塑性越大，硬化越严重。高锰钢 Mn12 的强化指数很大，切削后已加工表面的硬度提高 2 倍以上；有色合金金属的熔点低，容易弱化，加工硬化比结构钢轻得多，铜件比钢件小 30%，铝件比钢件小 75% 左右。

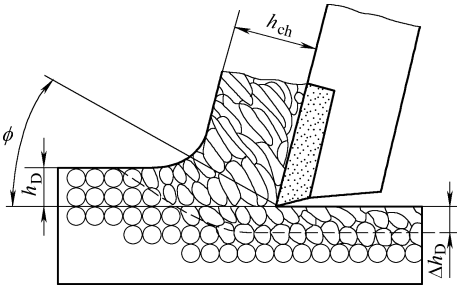


图 2-6-11　加工硬化

3）当进给量比较大时，切削力增大，表面层金属的塑性变形加剧，硬化程度增加。

4）切削速度增加时，塑性变形减小，塑性变形区也缩小，因此，硬化层深度减小。另一方面，切削速度增加时，切削温度升高，弱化过程加快。但切削速度增加，又会使导热时间缩短，因而弱化来不及进行。当切削温度超过 Ac_3 时，表面层组织将产生相变，形成淬火组织。因此，硬化层深度及硬化程度又将增加。硬化层深度先是随切削速度的增加而减小，然后又随切削速度的增加而增大。

采用有效的冷却润滑措施，可使加工硬化层深度减小。

5. 切削力

（1）总切削力　总切削力是指在切削过程中产生的作用在工件和刀具上的大小相等、方向相反的力。通俗地讲，它是指在切削加工时，工件材料抵抗刀具切削时所产生的阻力。如图 2-6-12a 所示，总切削力总是由切削层、切屑层和已加工表面产生的弹性变形力、塑性变形力以及切屑、已加工表面分别与前刀面、后刀面产生的摩擦力组成的。为了便于分析，将总切削力分解成三个相互垂直的分力。

1）切削力 F_c：在主运动方向上的分力。它是校验和选择机床功率，校验和设计机床主运动机构、刀具和夹具强度、刚性的重要依据。

2）背向力 F_p：垂直于工作平面上的分力。它是影响加工精度、表面粗糙度的主要原因。

3）进给力 F_f：进给运动方向上的分力，使工件产生弹性弯曲，引起振动。它是校验进给机构强度的主要依据。

（2）影响切削力的主要因素

1）工件材料的强度、硬度越高，剪切屈服强度越高，切削力就越大。强度、硬度相近的材料，塑性、韧性越大，则切削力越大。

2）切削用量的影响。

① 背吃刀量和进给量（f）加大一倍，切削力增大一倍。

② 进给速度（v_f）加大一倍，切削力增大 68%～86%。

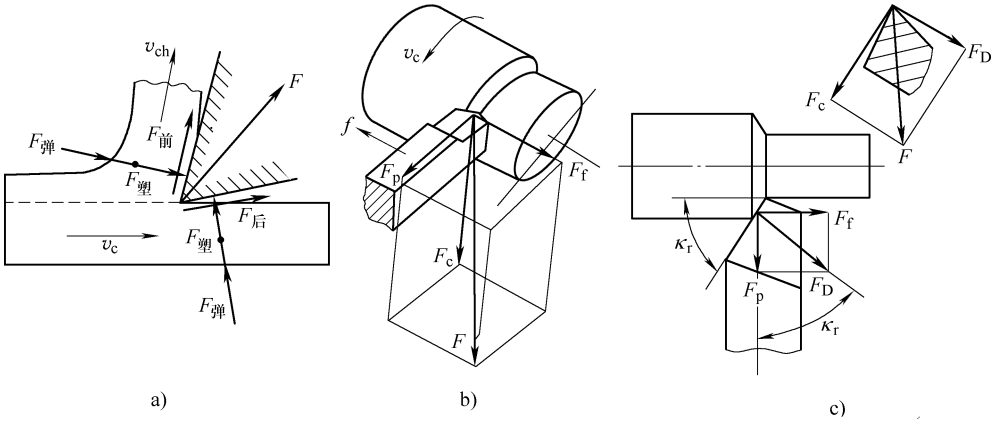
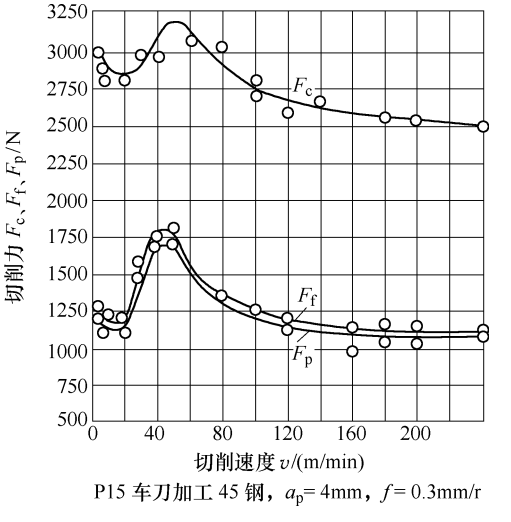


图 2-6-12　总切削力及分力

③ 切削速度增加对切削力的影响如图 2-6-13 所示。

3）刀具几何角度的影响。前角（γ_o）增大，变形减小，切削力减小；主偏角（κ_r）增大，背向力（F_p）减小、进给力（F_f）增大；刃倾角（λ_s）减小，F_p 增大、F_f 减小，对切削力 F_c 的影响不显著。



P15 车刀加工 45 钢，a_p= 4mm，f= 0.3mm/r

图 2-6-13　切削速度增加对切削力的影响

4）刀具磨损的影响。后刀面磨损形成零后角，且切削刃变钝、后刀面与已加工表面间的挤压和摩擦加剧，使切削力增大。

5）切削液可起到润滑作用，可减小刀具与工件之间的摩擦力，降低切削力。

6）刀具材料的影响。刀具材料与加工材料之间的亲和力和摩擦因素是影响切削力的主要因素，因此刀具材料的耐磨性高、刃磨后刀面表面粗糙度值小，切削力较小。

6. 切削热与切削温度

切削金属时，由于切屑剪切变形所做的功和刀具前刀面、后刀面摩擦所做的功都转变为热，这种热称作切削热。虽然传向刀具的切削热较小，但前刀面和后刀面上的温度却影响着切削过程和刀具的磨损情况。切削刃与切削温度对刀具磨损、刀具寿命及加工工艺系统热变形均产生重要的影响。

（1）切削热的产生原因　被切削的金属在刀具的作用下，发生弹性和塑性变形而耗功，这是切削热的一个重要来源。此外，切屑与前刀面、工件与后刀面之间的摩擦

也要耗功，也产生出大量的热量。因此，切削时共有三个发热区域，即剪切面、切屑与前刀面接触区、后刀面与过渡表面接触区，三个发热区与三个变形区相对应。所以，切削热的来源就是切屑变形功和前、后刀面的摩擦功。使用切削液时，刀具、工件和切屑上的切削热主要由切削液带走；不用切削液时，切削热主要由切屑、工件和刀具带走或传出，其中切屑带走的热量最大。

（2）影响切削热与切削温度的因素

1）切削用量对切削热的影响。切削速度 v_c 的影响最大，v_c 增大一倍，使切削温度增加 32%；进给量 f 的影响次之，f 增大一倍，切削温度增加 18%；背吃刀量 a_p 影响最小，a_p 增加一倍，切削温度增加 7%。这些影响规律的主要原因是，切削速度 v_c 提高，刀具与切屑间摩擦剧增；背吃刀量 a_p 增加，虽然变形、摩擦增加，但散热条件显著改善。

2）工件材料的影响。工件材料主要是通过硬度、强度和导热率影响切削温度。

材料硬度、强度低，导热率高，产生切削温度低。

3）刀具几何角度的影响。增大前角 γ_o，能减小变形和摩擦力，降低切削温度。γ_o 过大、减小了刀头体积，散热也会变差。实践表明，前角 $\gamma_o = 15°$ 左右对降低切削温度最为有效；主偏角 κ_r 减小，切削变形和摩擦增加，切削热增多，但 κ_r 减小后刀头体积增大，散热大大改善，故切削温度降低。

4）切削液的有效浇注方式是降低切削温度的非常重要的措施。

第二节　刀柄接口的种类及特点

一、镗铣类刀柄接口的分类

加工中心用刀柄接口系统即镗铣类数控工具系统，其主要作用是连接主轴与刀具，使刀具达到所要求的位置与精度，传递切削所需转矩及保证刀具的快速更换。镗铣类数控工具系统按结构形式可分为镗铣类整体工具系统和镗铣类模块工具系统两大类。

镗铣类整体工具系统中，每把刀具的柄部与夹持刀具的工作部分连接成一体，不同品种和规格的工作部分必须加工出一个能与机床相连接的柄部，这样使得工具的规格、品种繁多，给生产、使用和管理带来了诸多不便，同时增加了很多使用成本。为了克服镗铣类整体工具系统的弱点，自 20 世纪 80 年代以来，各国相继开发出多种模块工具系统。

我国制定的镗铣类数控工具系统按结构可分为 TSG 整体式工具系统和 TMG 模块式工具系统两大类。

二、各种刀柄接口的特性

1. 镗铣类整体式工具系统

（1）国内镗铣类 TSG 整体式工具系统　TSG 工具系统属于整体结构，是专门为加

工中心和镗铣类机床配套的工具系统，当然它也可应用于普通镗铣床。它的特点是将锥柄和连杆连接成一体，不同品种和规格的工作部分必须带有与机床连接的柄部。TSG 82工具系统如图 2-6-14 所示。

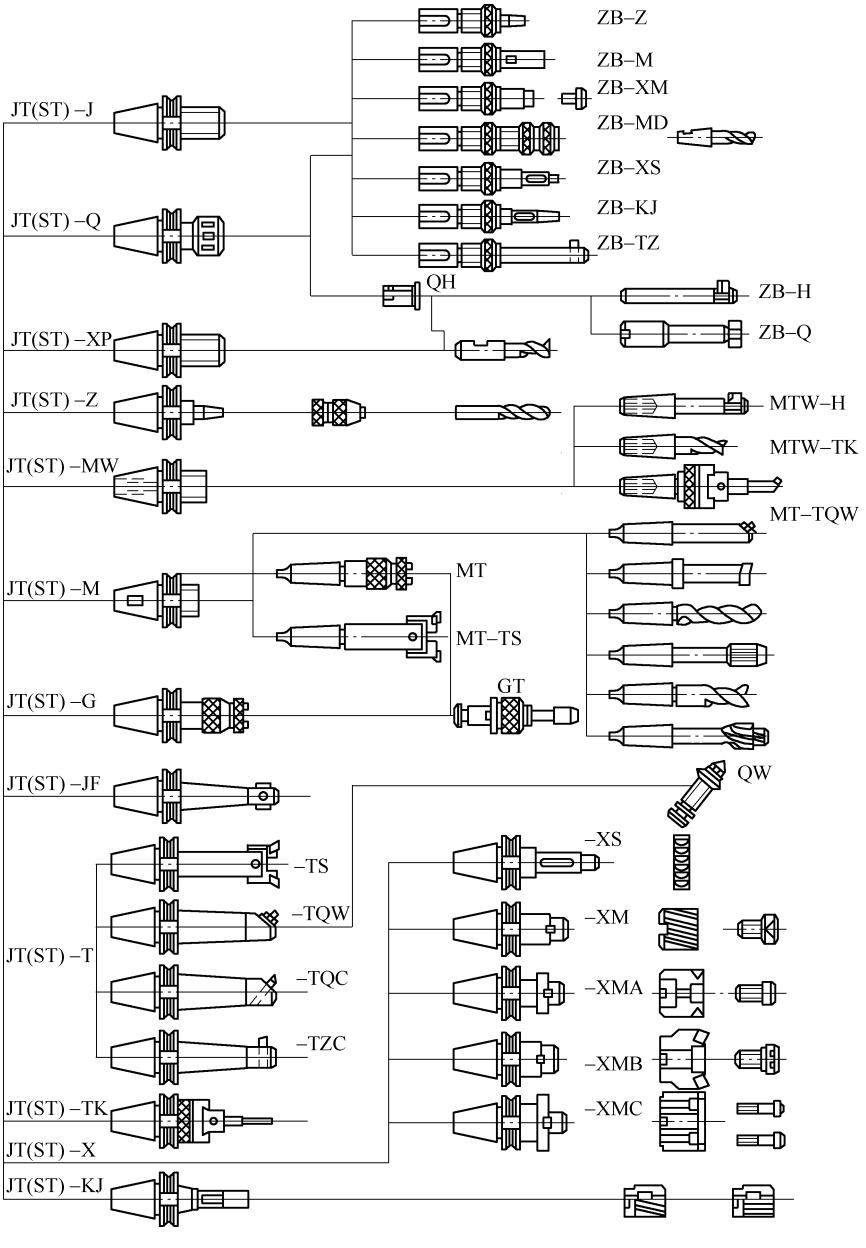


图 2-6-14　TSG 82 工具系统

TSG 工具系统号的表示方法如下：

工具系统的型号由五个部分组成，其表示方法见图 2-6-15 及表 2-6-1。

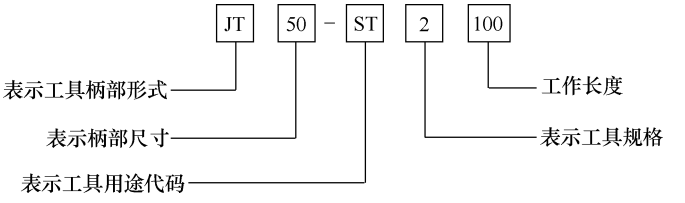


图 2-6-15　刀具编号说明

表 2-6-1　TSG 工具柄部形式

代　号	工具柄部形式	类　别	标　　准	柄部尺寸
JT	加工中心用锥柄，带机械手夹持槽	刀柄	GB/T 10944—2006	ISO 锥度号
BT	加工中心用锥柄，带机械手夹持槽	刀柄	JIS B6339	ISO 锥度号
ST	数控机床用锥柄，无机械手夹持槽	刀柄	GB/T 3837—2001	ISO 锥度号
MT	带扁尾莫氏圆锥工具柄	接杆	GB/T 1443—1996	莫氏锥度号
MW	不带扁尾莫氏圆锥工具柄	接杆	GB/T 1443—1996	莫氏锥度号
XH	7:24 锥度的锥柄接杆	接杆	JB/GQ 5010—83	锥柄锥度号
ZB	直柄工具柄	接杆	GB/T 6131.1—2006	直径尺寸

（2）7:24 锥柄的标准（表 2-6-2）

表 2-6-2　常用 7:24 锥柄结构标准

标准代号	简　　称	国家或组织	结构特点及通用性
DIN 69871	JT/SK/DIN/DAT/DV	德国	分 DIN 69871 A/AD 型和 DIN 69871 B 型两种，前者是中心内冷，后者是法兰盘内冷，其他尺寸相同
ISO 7388/1	IV/IT	ISO	刀柄安装尺寸与 DIN 69871 型相同，但 ISO 7388/1 型刀柄的 D_4 值小于 DIN 69871 型刀柄的 D_4 值，所以 ISO 7388/1 型刀柄可以安装在 DIN 6987 型锥孔的机床上，但 DIN 6987 型刀柄安装在 ISO 7388-1 型机床上可能发生干涉
MAS BT	BT	日本	安装尺寸与 DIN 69871、ISO 7388-1 及 ANSI 完全不同，不能换用。BT 型刀柄的对称型结构使它比其他三种刀柄的高速稳定性要好
ANSI B5.50	CAT	美国	安装尺寸与 DIN 69871、ISO 7388/1 类似，但少一个楔缺口，所以 ANSI B5.50 型刀柄不能安装在 DIN 69871 和 ISO 7388/1 机床上，但 DIN 69871 和 ISO 7388/1 刀柄可以安装在 ANSI B5.50 型机床上

采用 7:24 圆锥柄的刀具生产厂家主要生产四种标准的自动换刀刀柄：GB 10944.1、ISO 7388/1-A、DIN 69871-A、MAS403 BT 和 ANSI B5.50CAT。其中，GB 10944.1、ISO 7388/1-A 和 DIN 69871-A 是等效的。而 ISO 7388/1-B 为中心通孔内冷却型。目前国内加工中心常用 JT、BT 型两种，它们可直接与机床主轴连接（带机械手夹持槽）。JT 是采用国际标准 ISO 7388 制造的加工中心用锥柄部的代号；BT 是采用日本标准 MAS403 制造的加工中心机床用锥柄柄部的代号，见表 2-6-2。

（3）镗铣类整体工具系统的优点　该系统的优点是结构简单、整体刚性强、使用方便、工作可靠、更换迅速等。其缺点是工具的规格、品种繁多，给生产、使用和管

理带来诸多不便。

2. 镗铣类模块式结构工具系统

（1）我国开发的 TMG 工具系统　为了克服 TSG 系统的缺点，从 20 世纪 80 年代以来，我国相继开发了多种多样的镗铣类模块式工具系统（TMG 工具系统）。TMG 工具系统就是把工具的柄部和工作部分分割开来，制成各种系列化的中间模块，从而可以组装成不同用途、不同规格的模块式工具，如图 2-6-16 所示。

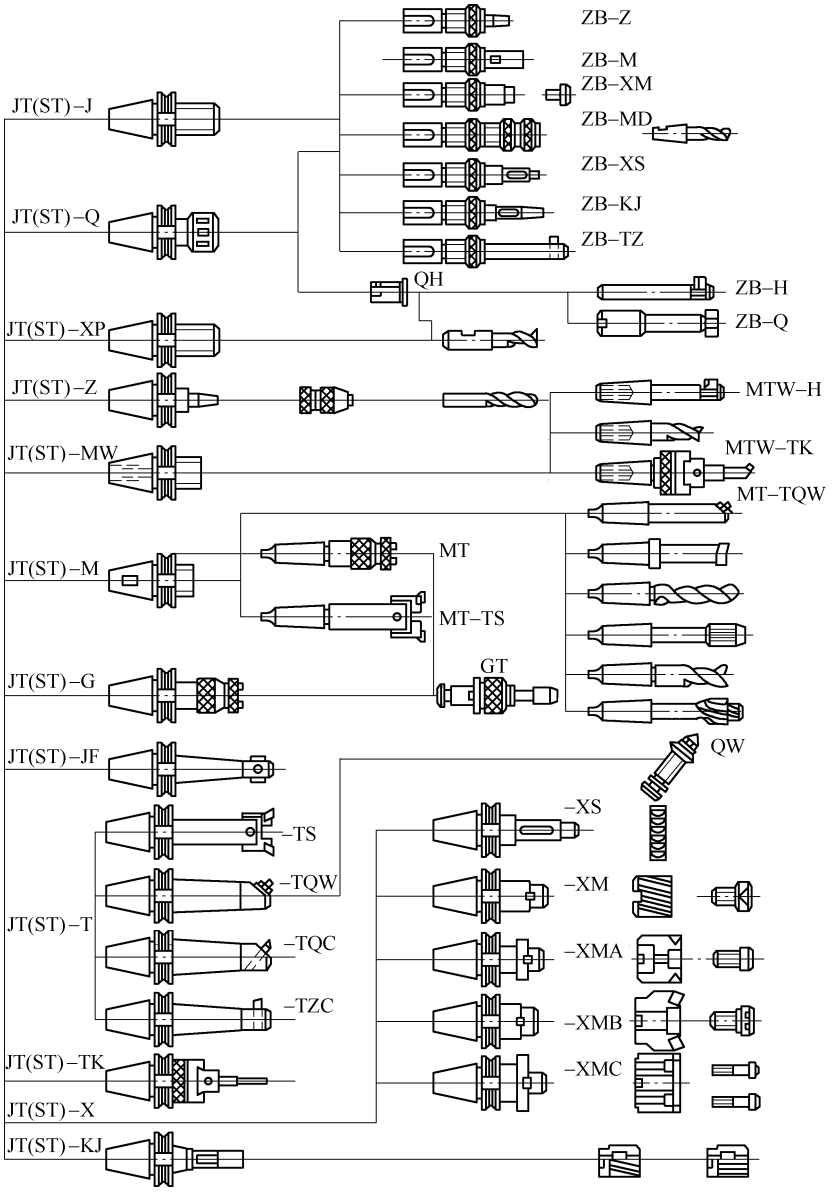


图 2-6-16　TMG 工具系统

国内镗铣类模块式工具系统可用其汉语“镗铣类”“模块式”“工具系统”三个词组的大写拼音字母来表示。在 TMG 之后加上两位数字，以表示结构的特征。

（2）TMG 数控工具系统的类型及特点　国内常见的 TMG 数控工具系统有 TMG10、TMG21 和 TMG28 等。

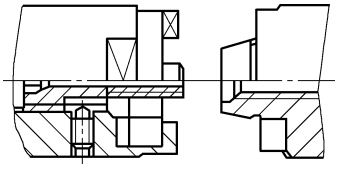
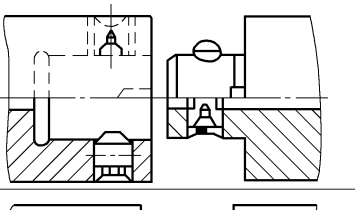
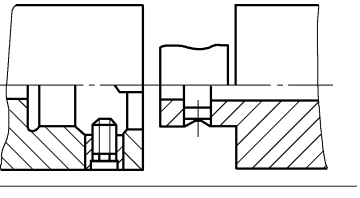
1）TMG10 模块式工具系统。采用短圆锥定心，轴向用中心螺钉拉紧，主要用于工作组合后不经常拆卸或加工件具有一定批量的情况。

2）TMG21 模块式工具系统。采用单圆柱面定心，径向销钉锁紧，它的一部分为孔，而另一部分为轴，连接插入连接机构成为一个刚性刀柄，一端和机床主轴连接，另一端则安装上各种可转位刀具便构成了一个先进的工具系统，主要用于重型机械、机床等各行业。

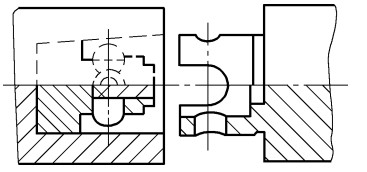
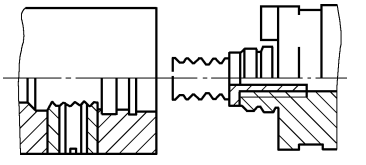
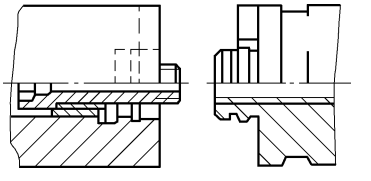
3）TMG28 模块式工具系统。我国开发的新型工具系统，采用单圆柱面定心，模块接口锁紧方式采用与前述 0～6 不同的径向锁紧方式（用数字 8 表示）。TMG28 工具系统互换性好，连接的重复精度高，模块组装、拆卸方便，模块之间的连接牢固可靠，结合刚性好，已达到国外模块工具的水平。主要使用于高效切削刀具（如可转位浅孔钻、扩孔钻和双刃镗刀等）。

（3）国外镗铣类模块式数控工具系统介绍　国外（主要是德国、瑞典等）开发了多种多样的模块式工具系统。有些工作模块与切削刀具制成一体（成为带有刀具的工作模块）。国外属于这类型的工具系统主要有：德国 Walter 公司的 Novex 工具系统，Komet 公司的 ABS 工具系统，Hertel 公司的 MC 工具系统以及瑞典 Sandvik 公司的 Varilock 工具系统等，见表 2-6-3。

表 2-6-3　国外典型模块式工具系统

名　称	特　性	简　图
Novex 工具系统	该工具系统由德国 Walter 公司开发，其接口形式为圆锥定心，锥孔、椎体与所在模块同轴，轴线上用螺钉拉紧。锥孔圆锥角略大于锥体圆锥角，造成结合时小端接触，拉紧后接触区会产生弹性变形，直至端面贴合，压紧为止。因采用轴向拉紧，使用中组装不太方便	
ABS 工具系统	该工具系统由德国 Komet 公司开发，其接口形式为两模块之间有一端圆柱配合，起定心作用。靠螺钉与夹紧销轴线之间的偏心，达到轴向压紧的目的	
MC 工具系统	该工具系统由德国 Hertel 公司开发，其接口定心方式与 ABS 相同，夹紧方式相似，把锥面、锥孔接触改为可转动钢球与夹紧销斜面的面接触。为了弥补轴向夹紧分力小的弱点，接触的环形端面上做出 Hirth 齿，其中间的夹紧销用硬质合金制造	

（续）

名　称	特　性	简　图
Widaflex UTS 工具系统	该工具系统由德国 Krupp 公司与美国 Kennametal 公司合作开发出的一种新的工具系统，其接口是用圆锥定心（锥度 5°43′），采用端面压紧来保证轴向定位精度和加大刚度	
Varilock 工具系统（轴向拉紧）	该轴向拉紧工具系统由瑞典 Sandvik 公司于 20 世纪 80 年代研制成，它是双圆柱配合，具有导向及定心作用，用中心螺钉拉紧，模块装卸显得不太方便	
Varilock 工具系统（径向拉紧）	1988 年开发出径向的锁紧系统	

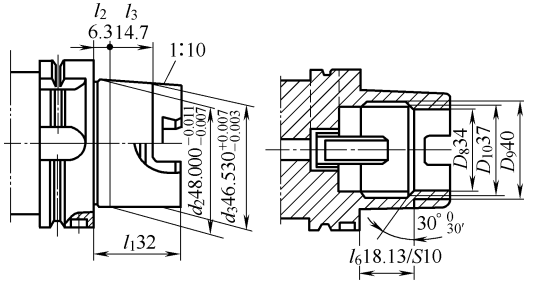
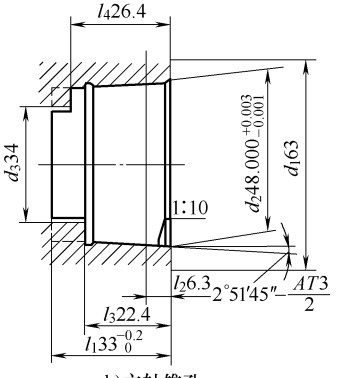
3. 新型空心短锥度的双面夹持系统

当代数控加工设备正向高效、精密、柔性、自动化方向发展，对工具的连接系统提出了更高的要求。国外一些大的工具公司竞相推出了各种新型工具系统，以满足加工需要。空心短锥工具系统是一种最新的产品，目前在欧美、日本已陆续推广应用，最近几年在国内也开始得到应用。

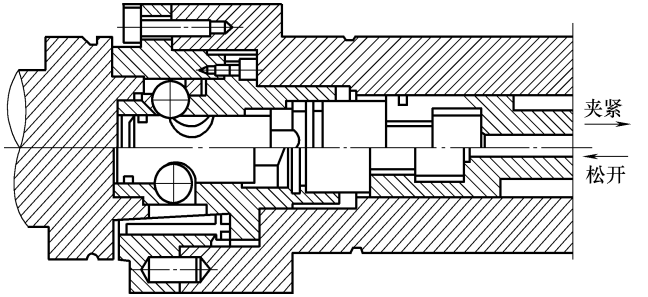
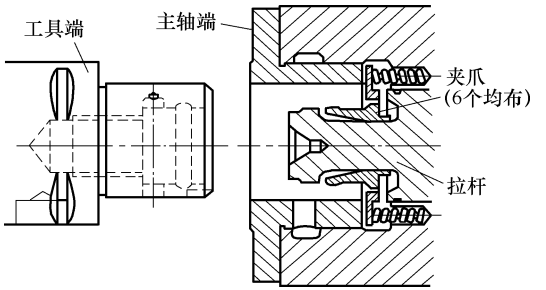
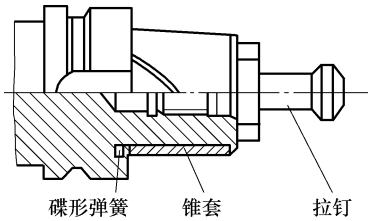
（1）主要空心短锥工具系统的优点　这种新系统与以往的工具系统相比具有以下显著的特点：有较高的定位精度，其径向、轴向重复定位精度一般在 0.002mm 以内，并能长期保持高精度；空心短锥刀柄采用了锥度和端面同时定位（过定位），所以连接的刚度高，传动转矩大。有良好的动、静态刚性，在同样的背向力作用下，其径向变形仅为 7∶24 锥度的 50%；非常适合高速加工，空心刀柄高速旋转时，在离心力作用下能够胀大，与主轴内孔紧密贴合。而传统的 7∶24 锥柄在高速切削时由于主轴孔胀大变形量大于刀柄，使主轴与刀柄产生间隙；它同时还有重量轻、尺寸小、结构紧凑的优点。空心短锥柄与 7∶24 锥柄比，重量减轻 50% 以上，长度仅为 7∶24 锥柄的 1/3，可缩短换刀时间。

（2）主要空心短锥工具系统的结构形式及特点　空心短锥工具系统开发于 20 世纪 80 年代。具有代表性的有：德国 1987 年开始研制的 HSK 工具系统；1987 年美国（Kennametal）开发的 KM 工具系统（最早应用于车床，1993 开始应用于加工中心等旋转设备）；1991 年瑞典（Sandvik Coromant）公司的 Capto 工具系统（既可应用于加工中心也可应用于车床）；日本日研（Nikken）公司的 NC5 工具系统等，见表 2-6-4。

表 2-6-4　加工中心用空心短锥度的双面夹持系统

名　　称	锥柄锥度	特　　性	
HSK 工具系统	1∶10	HSK 工具系统已列为德国 DIN 69893 标准和 ISO 标准。它分 A、B、C、D、E 和 F 六种型号，每种型号又有多种规格。右图为某种规格的 HSK-A63 刀柄及主轴锥孔，这种规格锥尾部有端面键槽以传递转矩，锥体孔内有 30°锥面，夹紧机构的夹爪钩在此面以拉紧刀柄。锥体与主轴锥孔有微小过盈，夹紧时薄壁锥体产生弹性变形，使锥体与端面同时靠紧，因而能牢固地夹紧刀柄	 a)刀柄  b)主轴锥孔

（续）

名　　称	锥柄锥度	特　　性	
KM 工具系统	1:10	KM 工具系统的刀柄的基本形状与 HSK 相似。它的最高使用转速可达到 50000r/min，定位精度高，在 0.002mm 以内。相对于 HSK，KM 系统刀柄显得单薄，有些零件的强度较差	
Capto 工具系统	1:20	与 HSK、KM 不同，Capto 的锥柄不是圆锥形，而是三棱锥，其棱为圆弧形。这种结构有以下优点：应力分散，分布合理，定心性好，精度高，适合高速旋转，转速为 15000～55000r/min	
NC5 工具系统	1:10	NC5 工具系统将 1:10 的锥柄分成锥套和圆柱柄两部分。锥套端面有碟形弹簧，锥柄尾部是螺钉孔，用于安装拉钉。这种卡紧机构简单可靠，强度高，还可采用增压夹紧机构，满足重切削的需要	

第三节　常用刀具材料及切削参数

现在常用的切削工具材料分类如图 2-6-17 所示。其中主要的工具材料有五种，分别为高速钢、硬质合金、立方氮化硼、聚晶金刚石和陶瓷类。刀具涂层方法包括物理气相沉积（PVD）法和化学气相沉积（CVD）法。

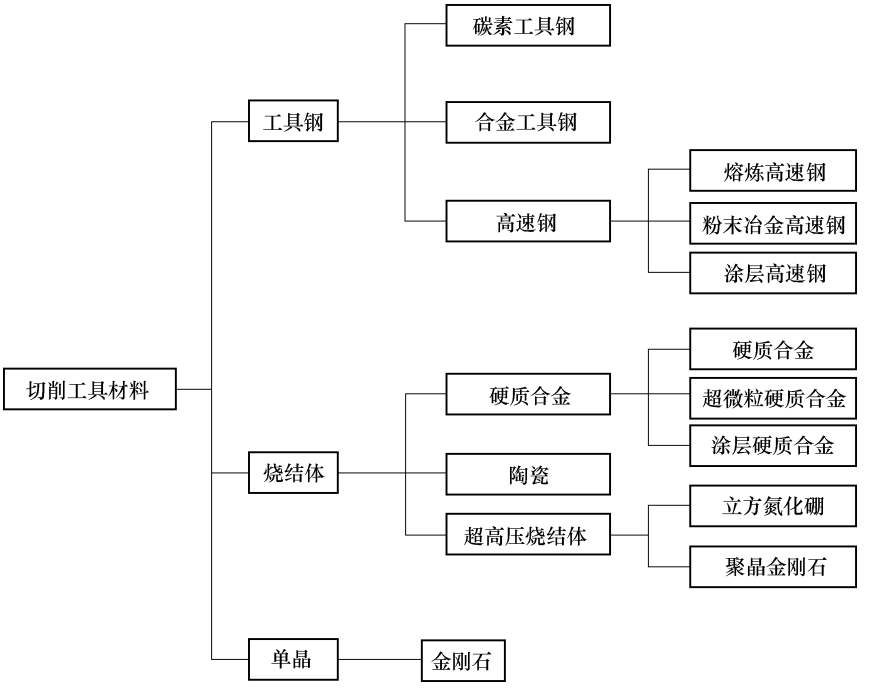


图 2-6-17　常用的切削工具材料

一、高速钢

高速钢是美国的 F. W. 泰勒和 M. 怀特于 1898 年创制的一种含碳的质量分数为 1% 的成分复杂的合金钢，含有钨、钼、铬、钒、钴（W-Mo-Cr-V-Co 是高速钢合金元素的习惯排列顺序）等碳化物形成元素，合金元素总量达 10%～25%。它在高速切削产生高热的情况下（约 500℃）仍能保持较高的硬度。这就是高速钢最主要的特性——热硬性。它是一种具有高硬度、高耐磨性和高耐热性的工具钢，又名风钢或锋钢，意思是其在空气中冷却也能达到很好的淬火硬化效果，并且很锋利。高速钢的热处理工艺较为复杂，必须经过退火、淬火、回火等一系列工艺。高速钢在开发出以后的大约 80 年间在切削工具中一直占据着统治地位，直到现在仍然占据切削工具的大约 1/3 的份额，而且切削性能更加优异的新种类也在开发中。

1. 高速钢的分类

高速钢是一种成分复杂的钢种，含碳的质量分数一般在0.70%～1.65%。含合金元素的质量分数较多，总量可达10%～25%。按切削性能可分为普通高速钢与高性能高速钢。普通高速钢有：钨系高速钢和钨钼系高速钢；高性能高速钢有：高碳高速钢、铝高速钢、钴高速钢和高钒速钢。按制造方法不同还可分为熔炼高速钢和粉末冶金高速钢。

2. 高速钢的性能

（1）普通高速钢

1）钨系高速钢。钨系高速钢是我国应用最多的高速钢，它具有较好的综合性能，有较高的常温硬度、强度、韧性和耐热性，通用性较强，常用于钻头、铣刀、拉刀、齿轮刀具、丝锥等复杂刀具的制造。但其强度随横截面尺寸变大而下降较多。钨系高速钢的典型牌号有W18Cr4V（简称W18），是我国最常使用的高速钢之一；由于其含钒量少，磨削性能好，刃口可以磨得非常锋利、平直，常温硬度63～66HRC，600℃高温时仍能保持48.5HRC的硬度。W18的热处理工艺性好，淬火时过热倾向小，抗塑性变形能力强。W18的缺点是碳分布常不均，剩余碳化物晶粒较大，如锻造不均，会影响薄刃刀具的使用寿命，制造大截面刀具时的抗弯曲强度显得不足。此外W18热塑性较差，不适做热轧刀具。鉴于以上缺点及国际市场钨价格的提高，W18已经逐渐被新钢种代替。

我国生产的另外一种钨系高速钢是W14Gr4VMn，因加入了少量的锰（Mn）和铼（Re），改善了碳化物分布状况并增大了热塑性。W14Gr4VMn的锻造、轧制工艺性和磨削加工性能良好，强度稍高于W18，切削性能与W18相当，热处理温度范围较宽，过热和脱碳敏感性较小，适合制作麻花钻等热轧刀具。

2）钨钼系高速钢。综合性能与钨系相近，但碳化物晶粒更小、分布更均匀，故强度和韧度好于钨系高速钢，可用于制造大截面尺寸的刀具，特别是热状态下塑性好，适于制造热轧刀具（如热轧钻头）。其主要缺点是热处理时脱碳倾向大，易氧化，淬火温度范围较窄。钨钼系高速钢的典型牌号是W6Mo5Cr4V2（简称M2）。在这种牌号的高速钢中用Mo代替了一部分W，与W18相比，M2的抗弯曲强度提高17%左右、冲击韧性调高40%以上，可用于制造能够承受较大冲击力的刀具、结构比较薄弱的刀具和截面较大的刀具。M2的热塑性、磨削加工性好，特别适用于制造轧制或扭制钻头等热成型刀具。M2的热硬性略低于W18，因此其高温切削性能较差。另外，热处理时脱碳倾向性大，淬火温度比较窄。

另外一种普通高速钢W9Mo3Cr4V（简称W9）是根据我国资源情况研制的含钨量较多、含钼量较少的钨钼高速钢。其常温硬度为65～66.5HRC，硬度和韧性的配合较好，抗弯强度和冲击韧性高于M2，热塑性、热稳定性都较好。由于含钒量少，其磨削加工性比M2好，磨削效率比M2高20%，表面粗糙度值也小，可用于制造锯条、钻头、拉刀、铣刀和齿轮刀等各种刀具；加工钢料时，刀具寿命相比于W18和M2都有一定提高。

（2）高性能高速钢

1）高碳高速钢。我国生产的高碳高速钢有 9W8Cr4V（简称 9W18）和 9W6Mo5Cr4V2（简称 CM2），常温硬度可达 66～68HRC，600℃时的硬度达到 51～52HRC，使用于制作耐磨性要求高的铰刀、锪钻和丝锥等刀具，也可用于切削奥氏体不锈钢。但钢中含碳的质量分数的增加使淬火残留奥氏体增多，需要增加回火次数，同时韧性降低，不能承受大的冲击。

2）铝高速钢。含铝超硬高速钢 W6Mo5Cr4V2Al（简称 501）和 W10Mo4Cr4V3Al（简称 5F-6）是我国独创的新钢种。常温硬度达 67～69HRC，600℃时的硬度达到 54～55HRC，切削性能与钴高速钢 M42 相当，刀具寿命比 W18 提高 1～2 倍以上，而价格却相差不多，制作齿轮滚刀时允许的切削速度为 1.67m/s。因含钒量多，其磨削加工性较差，而过热敏感性强，氧化脱碳倾向较大，使用时要严格掌握热处理工艺。

3）钴高速钢。高速钢中加入钴，可提高钢的热稳定性、常温和高温硬度及抗氧化性，改善高速钢的导热性，降低摩擦因数，从而提高切削速度，适合于制造加工高温合金、钛合金及其他难加工材料的高速钢刀具。由于我国钴资源有限，目前生产和使用不多。

4）高钒高速钢。由于形成大量高硬度、耐磨的碳化钒弥散在钢中，提高了高速钢的耐磨性，且能细化晶粒和降低钢的过热敏感性，适合于加工硬橡胶、塑料等对刀具磨损严重的材料。对于低速、薄切屑、精加工刀具，如拉刀、铰刀和丝锥等，高钒高速钢具有较长的寿命。其主要缺点是磨削加工性差，主要牌号有 W6Mo5Cr4V3、W12Cr4V4Mo 等。

各种合金元素对高速钢性能的影响见表 2-6-5。

表 2-6-5　各种合金元素对高速钢性能的影响

合金元素	影　响
C（碳）	一部分 C 用于增强基体金属及硬度，剩余的 C 与加入 Fe 中的 W、Mo、Cr、V 等一起形成复碳化物，提高硬度与耐磨性
	C 的质量分数越高，硬度与耐磨性越好，但韧性会降低，热锻、机械加工性也会变差
W（钨）	W 与 Fe、C 化合形成坚硬的复碳化物（M6C），可提高高温硬度与耐磨性
Mo（钼）	Mo 的影响与 W 大致相同，1%（质量分数）Mo 的合金效果大致相当于 2% 的 W
	Mo 可抑制结晶粒子的生长，增强韧性
Cr（铬）	Cr 可改善基体金属的淬火性并赋予它自硬性
	Cr 可提高碳化物的回火硬度与高温硬度
V（钒）	V 可增强耐软化性，提高高温硬度
	V 的碳化物非常坚硬，耐磨性好
	随着 V 含量的增加耐磨性提高，但可加工性恶化
Co（钴）	Co 全部溶入基体金属中，所以不会形成碳化物
	Co 可提高高温硬度及高温条件下的耐磨性
	耐软化性随着 W、V 的增加而提高，而添加 Co 会使提高加剧

5）粉末冶金高速钢。自问世以来，高速钢的生产大多采用传统冶金方法，即铸锭-锻轧工艺。由于钢的合金含量高，化学成分复杂，铸锭尺寸大，冷却速度缓慢等缘故，在其凝固时不可避免地会产生粗大的莱氏体碳化物偏析组织。而粉末冶金高速钢的生产是通过高压惰性气体（氩气或氮气）或高压水雾化高速钢水得到细小的高速钢粉末，再压制成刀具的材料，图 2-6-18 所示为粉末冶金工艺。

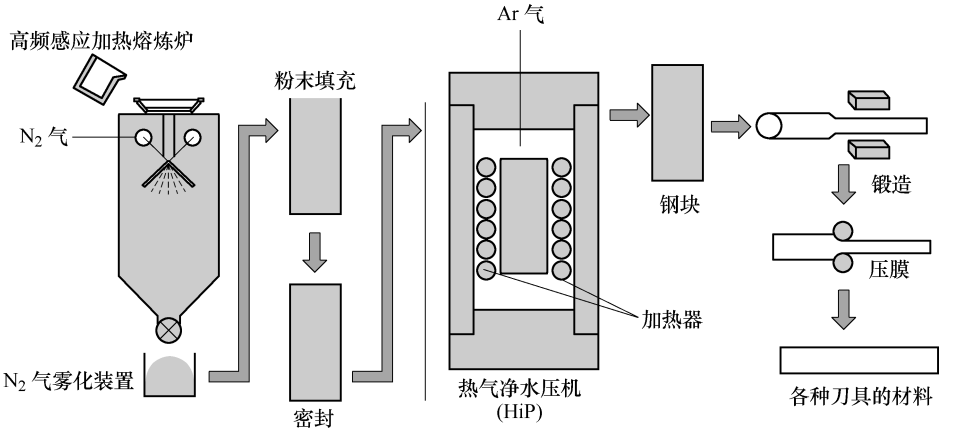


图 2-6-18　粉末冶金工艺

粉末冶金高速钢相比于普通冶炼高速钢具有以下一系列优点：无偏析、晶粒细小、碳化物细小；热加工性好；可磨削性好；热处理变形小；力学性能（韧性、硬度、高温硬度）佳；扩大了高速钢合金含量，扩大了使用领域。

随着硬质合金刀具的性能不断提高，发展了许多新品种，逐渐占据着高速钢刀具的市场份额。随着高速钢材料中的一些主要元素如钨的储藏资源在世界范围内日渐枯竭，因此高速钢面临严峻的发展危机。尽管高速钢刀具在全世界的销售额不断减少，但是高性能的钴高速钢和粉末冶金高速钢的使用量却在不断增加，主要用于钛合金等难加工材料的切削。它们相对于普通的高速钢有更好的耐磨性、热硬性和使用的可靠性，尤其是粉末冶金高速钢的性能更好，甚至在综合评价中优于硬质合金刀具。

粉末冶金高速钢的碳化物相比于熔炼高速钢的晶粒细小，并且分布均匀，它避免了熔炼高速钢的碳化物偏析，其强度、韧性相比于熔炼高速钢有很大提高，而且能保证各向同性，热处理时内应力和变形小，可以用它制造熔炼高速钢无法制造的合金元素高的刀具，适合制造各种精密和复杂刀具以及大型拉刀和齿轮刀具等，特别是切削时受冲击载荷的刀具效果更好，但是其成本比普通高速钢高出很多。

二、硬质合金

硬质合金是用高硬度、高熔点的金属碳化物（WC 碳化钨、TiC 碳化钛、TaC 碳化钽、NbC 碳化铌等）的粉末与 Co、Mo、Ni（镍）等黏结剂通过粉末冶金工艺制成的。

1. 硬质合金的分类

按使用领域的不同，国家标准 GB/T 18376.1—2008 将硬质合金分为 P、M、K、N、S、H 六类。再根据切削工具用硬质合金材料的耐磨性和韧性的不同，分成若干组，用 01、10、20…等两位数字表示组号。必要时可以在两个组号之间插入一个补充组号，用 05、15、25…等表示。

1）P 类是以 TiC、WC 为基，以 Co（Ni + Mo、Ni + Co）作为粘结剂的合金/涂层合金，主要用于长切屑材料的加工，如钢、铸造钢、长切屑可锻铸铁。

2）M 类是以 WC 为基，以 Co 作为粘结剂，添加少量的 TiC（TaC、NbC）的合金/涂层合金，主要用于加工不锈钢、铸钢、锰钢、可锻铸铁、合金钢、合金铸造铁等材料。

3）K 类是以 WC 为基，以 Co 作粘结剂，或添加少量 TaC、NbC 或 CrC 的合金/涂层合金，主要用于短切屑材料的加工，如铸铁、冷铸造铸铁、短切屑可锻铸铁、灰口铸铁等的加工。

4）N 类是以 WC 为基，以 Co 作为粘结剂，或添加少量 TaC、NbC 或 CrC 的合金/涂层合金，主要用于加工有色金属、非金属材料，如铝、镁、塑料、木材等。

5）S 类是以 WC 为基，以 Co 作为粘结剂，或添加少量 TaC、NbC 或 CrC 的合金/涂层合金，主要加工耐热类和优质合金材料，如耐热钢，含镍、钴、钛的各类合金材料。

6）H 类是以 WC 为基，以 Co 作为粘结剂，添加少量 Tac、NbC 或 CrC 的合金/涂层合金，主要加工硬切削材料，如淬硬钢、冷硬铸铁等。

2. 硬质合金刀具的特性

由于硬质合金的碳化物含量远远高于高速钢，因此其具有硬度高（72 ~ 82HRC）、熔点高、化学稳定性好、热稳定性好的特点，但相比于高速钢其韧性、脆性较差，承受冲击和抗弯能力低。硬质合金的热硬性较好，在 600℃时硬质合金刀具的硬度超过常温下的高速钢刀具，切削效率是普通高速钢的 5 ~ 10 倍，是目前数控刀具主要使用的材料。

常用牌号的硬质合金材料的性能见表 2-6-6。

表 2-6-6　常用牌号的硬质合金材料的性能

牌号	作业性能		力学性能	
	被加工材料	适应的加工条件	洛氏硬度 HRA，不小于	抗弯强度 R_{tr}/MPa，不小于
P01	钢、铸钢	高切削速度、小切屑截面，无震动条件下精车、精镗	92.3	700
P10	钢、铸钢	高切削速度，中、小切屑截面条件下的车削、仿形车削、车螺纹和铣削	91.7	1200
P20	钢、铸钢、长切屑可锻铸铁	中等切削速度、中等截面条件下的车削、仿形车削和铣削、小切削截面的刨削	91.0	1400

（续）

牌号	作业性能		力学性能	
	被加工材料	适应的加工条件	洛氏硬度 HRA，不小于	抗弯强度 R_{tr}/MPa，不小于
P30	钢、铸钢、长切屑可锻铸铁	中或低等切削速度、中等或大切屑截面条件下的车削、铣削、刨削和不利条件下的加工	90.2	1550
P40	钢、含砂眼和气孔的铸钢	低切削速度、大切屑角、大切屑截面以及不利条件下的车削、刨削、切槽和在自动机床上加工	89.5	1750
M01	不锈钢、铁素体钢、铸钢	高切削速度、小载荷，无震动条件下精车、精镗	92.3	1200
M10	不锈钢、铸钢、锰钢、合金钢、合金铸铁、可锻铸铁	中、高等切削速度，中、小切屑截面条件下的车削	91.0	1350
M20	不锈钢、铸钢、锰钢、合金钢、合金铸铁、可锻铸铁	中等切削速度、中等切屑截面条件下车削、铣削	90.2	1500
M30	不锈钢、铸钢、锰钢、合金钢、合金铸铁、可锻铸铁	中、高等切削速度、中等或大切屑截面条件下的车削、铣削、刨削	89.9	1650
M40	不锈钢、铸钢、锰钢、合金钢、合金铸铁、可锻铸铁	车削、切断、强力铣削加工	88.9	1800
K01	铸铁、冷硬铸铁、短屑可锻铸铁	车削、精车、铣削、镗削、刮削	92.3	1350
K10	布氏硬度高于 220 的铸铁、短切屑的可锻铸铁	车削、铣削、镗削、刮削、拉削	91.7	1460
K20	布氏硬度低于 220 的灰口铸铁、短切屑的可锻铸铁	用于中等切削速度下、轻载荷粗加工、半精加工的车削、铣削、镗削	91.0	1550
K30	铸铁、短屑可锻铸铁	用于不利条件①下可能采用大切削角的车削、刨削、切槽加工，对刀片的韧性有一定的要求	89.5	1650
K40	铸铁、短屑可锻铸铁	用于不利条件下的粗加工，采用较低的切削速度，大的进给量	88.5	1800
N01	有色金属、塑料、木材、玻璃	高切削速度下，有色金属铝、铜、镁、塑料、木材等非金属材料的精加工	92.3	1450
N10		较高切削速度下，有色金属铝、铜、镁、塑料、木材等非金属材料的精加工或半精加工	91.7	1560

（续）

牌号	作业性能		力学性能	
	被加工材料	适应的加工条件	洛氏硬度 HRA，不小于	抗弯强度 R_{tr}/MPa，不小于
N20	有色金属、塑料	中等切削速度下，有色金属铝、铜、镁、塑料等的半精加工或粗加工	91.0	1650
N30		中等切削速度下，有色金属铝、铜、镁、塑料等的粗加工	90.0	1700
S01	耐热和优质合金：含镍、钴、钛的各类合金材料	中等切削速度下，耐热钢和钛合金的精加工	92.3	1500
S10		低切削速度下，耐热钢和钛合金的半精加工或粗加工	91.5	1580
S20		较低切削速度下，耐热钢和钛合金的半精加工或粗加工	91.0	1650
S30		较低切削速度下，耐热钢和钛合金的继续切削，适于精加工或粗加工	90.5	1750
H01	淬硬钢、冷硬铸铁	低切削速度下，淬硬钢、冷硬铸铁的连续轻载精加工	92.3	1000
H10		低切削速度下，淬硬钢、冷硬铸铁的连续轻载精加工、半精加工	91.7	1300
H20		较低切削速度下，淬硬钢、冷硬铸铁的连续轻载半精加工、粗加工	91.0	1650
H30		较低切削速度下，淬硬钢、冷硬铸铁的半精加工、粗加工	90.5	1500

① 不利条件是指原材料或铸造、锻造的零件表面硬度不匀，加工时的切削深度不匀，间断切削以及振动等情况。

三、聚晶立方氮化硼（Polycrystalline Cubic Boron Nitride，PCBN）刀具

PCBN 刀具是利用人工方法在高温高压条件下用立方氮化硼（CBN）微粉和少量的结合剂合成的烧结体制作成的。它具有很高的硬度，其硬度及耐磨性仅次于金刚石而远远高于其他材料，因此他与金刚石刀具统称为超硬材料，切削速度比硬质合金高 10～20 倍，刀具寿命比硬质合金高 3～5 倍；它也有较好的热稳定性和化学惰性，因此常用于黑色金属的切削；它的导热性比金刚石差但比其他材料高得多，抗弯强度和断裂韧度介于硬质合金和陶瓷之间。用 PCBN 刀具，可加工以前只能用磨削方法加工的特种钢，它还非常适合数控机床加工时使用。

1. PCBN 刀具的制作方法

（1）制作烧结体　就是将 CBN 粉末或金刚石粉末与结合剂的混合粉末及硬质合金基板填充入密封盒中，在高温高压条件下烧结的同时使其与基体结合。烧结体的制作方法如图 2-6-19 所示。

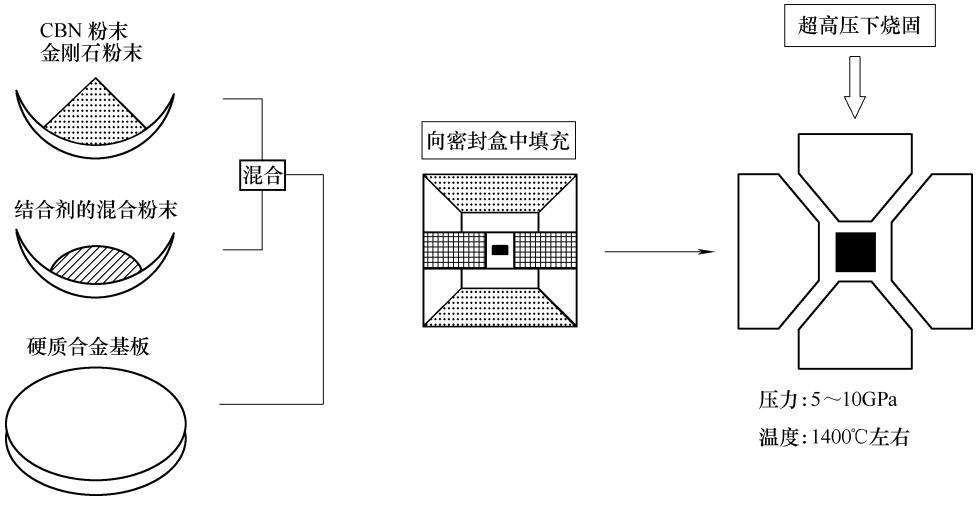


图 2-6-19　烧结体的制作方法

（2）PCBN 刀具的制作　首先对烧结体原材料进行切断加工，然后将其焊接在硬质合金基体上形成刀片，或焊接于钢的刀具支撑体上，再对切削刃进行研磨精加工，最终形成可以使用的刀具。PCBN 刀具的制作方法如图 2-6-20 所示。

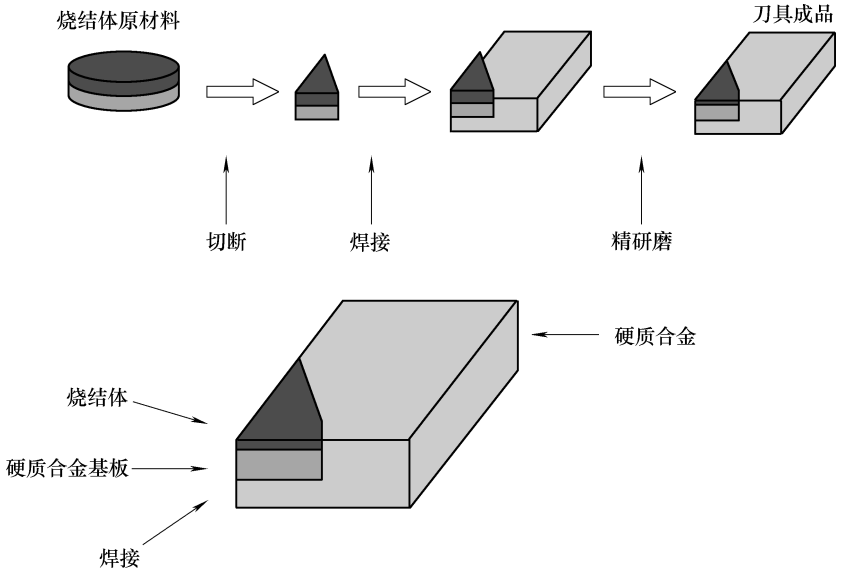


图 2-6-20　PCBN 刀具的制作方法

2. PCBN 刀具的分类

PCBN 刀具按添加成分可分为：直接由 CBN 单晶烧结而成的 PCBN 和添加一定比例粘结剂的 PCBN 烧结体两大类。按制造复合方式分为：有粘结剂复合烧结的 PCBN 复合片和整体 PCBN 烧结块的两类，其中粘结剂烧结的 PCBN 又分为使用金属粘结剂与使用陶瓷粘结剂两类。目前应用较广的是带粘结剂的 PCBN 复合片，根据添加的粘结剂比例不同则 PCBN 硬度也不同，粘结剂含量越多则硬度越低、韧性越好。

（1）加入金属粘结剂的 CBN 烧结　金属粘结剂种类很多，主要有 Ni、Co、Ti、Ti-Al 等。在烧结温度下，金属粘结剂称为液相，液相的出现对 CBN 烧结有一定的促进作用，因此烧结体可以在稍低的温度和压力下进行。另外，由于 CBN 不溶于金属粘结剂，不会发生可以促进收缩和晶体长大的溶解析出过程。在烧结过程中，硬质合金中的钴呈液态渗入 CBN 晶界中，将硬质合金与 CBN 烧结体紧密粘结在一起。采用金属粘结剂的 PCBN 刀具的硬度较纯 CBN 烧结的刀具硬度低，但是韧性好。

（2）加入陶瓷粘结剂的 PCBN 烧结　陶瓷粘结剂主要有 TiN、TiC、Al_2O_3 等。由于烧结过程中易产生裂纹，因此多在陶瓷粘结剂中加入铁族元素（铁、钴和镍）以及 Mo 或 Mo_2C 等可以增加陶瓷离子间的强度，起到流体传压介质的作用，有利于形成内部无变形的烧结体，钼等还可以改进陶瓷粒子和铁元素之间的润湿性。陶瓷粘结剂 PCBN 中粘结剂的含量一般较高，韧性较金属粘结剂刀具差，但其抗高温性能更好。

（3）纯 PCBN 烧结　在 CBN 聚晶体中也可以不加粘结剂直接烧结成聚晶立方氮化硼。CBN 在烧结时出现再结晶和晶粒长大过程，烧结后的 CBN 多晶体的晶粒已不是原来的 CBN 单晶体颗粒。这种 PCBN 刀具耐磨性好，使用寿命长，但较脆且温度条件苛刻，难以制成高韧性及大尺寸的刀片。

3. PCBN 的特性

CBN 的耐热性可达 1400～1500℃，在 800℃时的硬度相当于 Al_2O_3-TiC 陶瓷的常温硬度；CBN 材料的导热系数低于金刚石但大大高于硬质合金，并且随着切削温度的提高，PCBN 刀具的导热系数不断增大，因此可使刀尖处热量很快传出，有利于工件加工精度的提高；CBN 与不同材料的摩擦因数很低，在加工过程中切削力很小；由于 PCBN 刀具材料具有上述优点，所以它是最适合用于高速条件下的干式切削加工的刀具材料。

PCBN 刀具在使用时需注意尽量不使用水溶性切削液，因为 CBN 易在 1000℃产生水解作用，造成刀具严重磨损。

四、聚晶金刚石（Polycrystalline Diamond，PCD）刀具

金刚石是碳的同素异形体，是自然界已知的最硬的材料，分为天然与人造两类，除少数超精密级特殊用途外，工业上多使用人造聚晶金刚石作为刀具及磨具材料。PCD 刀具的制作方法与 PCBN 刀具相似。

1. PCD 刀具的特性

PCD 刀具有极高的硬度，它的硬度可达 8000HV，比硬质合金（1300～1800HV）的硬度高好几倍。但其脆性很大、抗冲击能力差，对振动敏感，要求机床精度高、平稳性好；PCD 的导热率很高，为硬质合金的 1.5～9 倍，甚至高于铜，因此 PCD 刀具热量传递迅速；PCD 的摩擦因数与热膨胀系数都很小，因此 PCD 刀具切削力和热变形都很小，工件的加工精度很高；PCD 刀具与有色金属和非金属材料间的亲和力很小，在加工过程中切屑不易粘结在刀尖上形成积屑瘤；但金刚石与铁元素具有很强的亲和力，所以 PCD 刀具一般不适合加工铁系金属。

2. PCD 刀具的应用

由于 PCD 刀具的特殊性能，所以它主要用于高速精细车削或镗削各种有色金属及合金，如铝合金、铜合金、镁合金等，也可用于加工钛合金、金、银、铂、各种陶瓷和水泥制品；同时对于各种非金属材料，如石墨、橡胶、塑料、玻璃及聚合材料的加工效果都很好。

五、陶瓷材料

陶瓷材料包括玻璃、陶瓷等传统陶瓷与耐热性、耐腐蚀性优异的高性能陶瓷。常用的陶瓷刀具材料是以 Al_2O_3 或 Si_3N_4 为基体成分在高温下烧结而成的。其硬度达 91～95HRA，耐磨性比硬质合金高十几倍，适用于加工冷硬铸铁和淬硬钢；在 1200℃高温下仍能切削，高温硬度可达 80HRA，切削速度比硬质合金高 2～10 倍；具有良好的抗粘接性能，而且它与多种金属的亲和力小；化学稳定性好，即使在其熔化时，与钢也不起相互作用；同时具有很强的抗氧化性。

1. 陶瓷刀具材料的分类

陶瓷刀具材料主要分为氧化铝系（Al_2O_3）、氮化硅系（Si_3N_4）、硅铝氧氮系（SiAlON，赛隆陶瓷）

（1）氧化铝系陶瓷

1）纯氧化铝陶瓷（Al_2O_3）。这是最早发展起来的一种刀具陶瓷材料，它是加入质量分数为 0.1%～0.5% 的 MgO 或其他玻璃氧化物如 Cr_3O_3、TiO_2 等混合粉末，经冷压或热压制成的。

2）氧化铝-碳化物陶瓷（Al_2O_3-TiC）。这种陶瓷是在氧化铝中添加百分之几到百分之几十的多种碳化物的组合陶瓷，如添加 TiC、WC、SiC 和 TaC 等，其中以添加 TiC 的 Al_2O_3-TiC 陶瓷应用最多，TiC 的添加量（质量分数）在 30%～60% 之间，也有添加 5%～10% 的。

3）氧化铝-氧化锆陶瓷（Al_2O_3-ZrO_2）。纯 Al_2O_3 和 Al_2O_3-TiC 陶瓷是以提高组织的致密度，采用更细微的晶粒手段来增加陶瓷的密度，而 Al_2O_3-ZrO_2 陶瓷是在 Al_2O_3 基陶瓷中添加可诱导微观裂纹的 ZrO_2 形成的陶瓷，这种微观裂纹可以吸收断裂能，增加陶瓷的韧性。

4）氧化铝-硼化钛陶瓷（Al_2O_3-TiB_2）。在 Al_2O_3 基陶瓷中添加硼化钛（TiB_2）作

为粘结剂，用冷压或热压法制成的 Al_2O_3-TiB_2 陶瓷。这种陶瓷组织中具有细晶粒 Al_2O_3 和 TiB_2 连续的粘结相，因而具有极好的韧性和耐磨性。

（2）氮化硅系陶瓷（Si_3N_4）

1）氮化硅陶瓷（Si_3N_4）。它是将硅粉在 1350～1400℃高温下通氮气氮化后进行球磨，并添加微量助烧结剂如 MgO（氧化镁）、Al_2O_3 或 Y_2O_3（氧化钇）等然后经 1700～1750℃的温度和 20～30MPa 的压力下热压烧结而成，呈灰白或黑灰色。

2）组合氮化硅陶瓷。它包括两种组合氮化硅陶瓷，一种是在氮化硅中添加复合强化剂 TiC、Co 等烧结而成；另一种组合碳化硅陶瓷是在氮化硅陶瓷（体积分数 92%）中添加 6% 和 2% 的其他成分构成组合碳化硅陶瓷的基体材料，以占总体积分数 70% 的基体材料再添加占总体积 30% 的强化剂 TiC 制成的一种无钴新型 Si_3N_4-TiC 组合陶瓷。

（3）复合硅铝氧氮（Si_3N_4-Al_2O_3，SiAlON，赛隆陶瓷）系陶瓷　这是在 1980 年代末期发展起来的刀具材料，它是采用粉末冶金工艺在 1600～2000℃高温下热烧结而成。具有极好的高温性能、抗热冲击和抗机械冲击韧性。它实际上是 Si_3N_4 中 Si、N 原子被 Al 和 O 原子置换所形成的一大类固溶体的总称。

2. 陶瓷刀具的性能

陶瓷刀具的硬度高，因此耐磨性好。可用于加工传统刀具难以加工或根本不能加工的高硬材料，例如硬度达 65HRC 的各类淬硬钢和硬化铸铁，因而可免除退火加工所消耗的能源，并因此也可提高工件的硬度，延长机器设备的使用寿命。陶瓷刀具能对高硬度材料进行粗、精加工，也可进行铣削、刨削、断续切削和毛坯拔荒粗车等冲击力很大的加工；陶瓷刀具切削时与金属摩擦力小，切削不易粘接在刀片上，不易产生积屑瘤，加上可以进行高速切削，所以在条件相同时，工件表面粗糙度值比较小。

陶瓷刀具耐高温、热硬性好，可在 1200℃下连续切削，所以陶瓷刀具的切削速度比硬质合金高很多，可进行高速切削或实现“以车、铣代磨”。而且氮化硅陶瓷刀具的主要原料是自然界很丰富的氮和硅，用它代替硬质合金，可节约大量的 W、Co、Ta 和 Nb 等重要的金属。

六、涂层刀具

在韧性较好的刀具（刀片）基体上进行表面涂层，涂覆具有高硬度、高耐磨性、耐高温材料的薄层（如 TiN、TiC 等），使刀具（刀片）具有全面、良好的综合性能。

涂层技术的迅速发展，使涂层刀具得到了广泛应用。1969 年德国克虏伯（Krupp）公司和瑞典山特维克（Sandvik）公司研发成功了化学气相沉积 CVD 涂层技术，并向市场推出了 CVD 法的 TiC 涂层硬质合金刀片产品。20 世纪 70 年代初，美国本夏（R. Runshan）和拉格胡南（A. Raghuran）研发了物理气相沉积 PVD 工艺，并于 1981 年将 PVD 工艺的 TiN 高速钢刀具产品推向市场。当时 CVD 涂层工艺温度

约1000℃，主要用于硬质合金刀具（刀片）的表面涂层；PVD涂层工艺温度为500℃和500℃以下，主要用于高速钢刀具的表面涂层。后来，CVD和PVD涂层技术迅速发展，在涂层材料、涂层设备和工艺等方面都有了很大进步，而且发展了多层材料的涂覆技术，使涂层刀具（刀片）的使用性能有了很大的提高。PVD涂层技术过去主要用于高速钢刀具，而近年来随着PVD涂层技术飞跃发展，也可成功用于硬质合金刀具（刀片），占领了硬质合金涂层刀具（刀片）的一半份额。现在，涂层高速钢刀具和涂层硬质合金刀具（刀片）广泛应用，已占全部刀具使用总量的50%以上。

1. 化学气相沉积（CVD）法

过去，硬质合金刀具表面涂层采用高温化学气相沉积（HTCVD）工艺。在常压或负压的沉积系统中，将纯净的H_2、CH_4、N_2、$TiCl_4$、$AlCl_3$、CO_2等气体根据沉积物的成分，按一定配比均匀混和，依次涂到具有一定温度（一般为1000～1050℃）的硬质合金刀片表面，即在刀片表面沉积TiC、TiN、TiCN、Al_2O_3或者它们的复合涂层。直到现在，HTCVD仍是使用最多的工艺方法，除HTCVD外，还有等离子体化学气相沉积（PCVD）工艺，它是在硬质合金刀具（刀片）表面涂层的另一种方法，因这种涂层工艺温度较低（700～800℃），故刀片的抗弯强度降低小。因为TiC与基体材料的线膨胀系数最接近，通常用TiC薄层先涂在基体表面上，外面再涂TiN、Al_2O_3，如TiC-TiN、TiC-Al_2O_3、TiC-TiCN-TiN等。

后来各国发展出了各种不同组合的多层涂层，其组合方式有：TiCN-Al_2O_3、TiCN-TiC-TiN、TiCN-TiC-Al_2O_3、TiCN-Al_2O_3-TiN、TiCN-TiC-Al_2O_3-TiN、TiCN-Al_2O_3-TiCN、TiC-TiCN-TiN、TiN-TiCN-TiN等。可以看出，近年多用TiCN或TiN作底层，这是因为基体硬质合金有了改进，例如采用了梯度结构。此外，TiN涂层不宜单独使用，因为与硬质合金相比，TiN的硬度提高不多，TiN必须与TiC、TiCN、Al_2O_3等组合使用。

2. 物理气相沉积（PVD）法

早期，PVD涂层均采用“真空蒸镀法”，膜层往往不均匀，与基体的结合不够牢固，随后又发展了“真空磁控溅射法”和“真空等离子镀工艺”等工艺，效果很好。现在刀具表面涂层主要用后两种方法。

早年，PVD涂层只用于高速钢刀具，涂层材料几乎只用TiN一种。后来，改进了涂层工艺，发展了多种涂层材料和多层涂层，在硬质合金刀具上也得到了大量的应用。涂层效果比以往大有进步。TiN涂层材料仍在使用，新兴的涂层材料是TiAlN和AlTiN，其使用效果优于TiN。

欧洲的PVD涂层技术水平最高，领先于其他国家和地区。知名的厂商有欧瑞康巴尔查斯（OerlkonBalzers）公司、德国PVT等离子真空技术公司和丹麦尤尼莫克（Unimerco）公司等。他们的PVD涂层设备和工艺先进，涂层材料品种多，涂层刀具和其他产品使用性能好。

3. CVD 法与 PVD 法的优点与缺点（表 2-6-7）

表 2-6-7　CVD 法与 PVD 法的优点与缺点

主要涂层物质	优　　点	缺　　点
TiC、TiCN、TiN、Al_2O_3 等	可涂覆热稳定性优异的 Al_2O_3，可用于高速切削交加工	需要在高温（900～1100℃）条件下进行处理，因此对基体材料有限制，不适用于高速钢、焊接刀具，基体只限于硬质合金
	基体与涂层的密合性好，可形成比较后的涂层，耐磨损性能优异，寿命长	可能会引起表面与切削刃强度的下降，但不适用于易发生破损的锋利刃口
	通过更换原料气体，可以在同一装置中连续涂覆多种物质，容易涂覆多层材料	涂层膜上产生拉伸残余应力，会导致耐破损性下降，需要使用专用的硬质合金基体材料
		涂层表面易起毛，精加工时有可能会发生粘结
TiC、TiCN、TiN、AlN-TiN、AlN-TiN-SiN、CrN 等	可以在较低温度条件下（700℃以下）进行涂覆，因此对基体的制约少，可适用于高速钢、焊接刀具、硬质合金、金属陶瓷等多种材料	涂覆不导电的各种氧化物（绝缘物）比较困难 基体很难与涂层密合，不适合厚膜涂层，涂层的结合力比 CVD 法差
	切削刃强度（韧性）下降少，可适用于锋利刃口的刀具	
	涂层膜上产生残余压应力，耐破损性、耐热龟裂性优异	
	涂层表面比较光滑，适用于精加工	

4. 各种硬质物质的材料特性（表 2-6-8）

表 2-6-8　各种硬质物质的材料特性

材料	性　　能			
	耐后刀面磨损性	耐塑性变形性 耐热龟裂性	耐边界磨损性	耐粘结性
	硬度（HV）	导热系数/[W/(m·K)]	刀片反应的温度/℃	1250℃时与铁的溶解度（%）
WC	1780	121	500	7
TiC	3200	24	1100	<0.5
TiN	2050	19	1200	≈0
Al_2O_3	2100	29	安定	≈0

5. CVD 法与 PVD 法的适用范围（表 2-6-9）

表 2-6-9　CVD 法与 PVD 法的适用范围

类　　型	对各种刀具的适应性	
	CVD 法	PVD 法
普通车削刀用片	较好	一般
普通铣削刀用片	较好	较好
钻削用刀片	较好	较好
精密加工用刀片（螺纹切削、微细加工用）	一般	较好
整体、焊接立铣刀	差	较好
整体、焊接钻头	差	较好

七、各种刀具材料的使用区别（表 2-6-10）

表 2-6-10　各种刀具材料的使用区别

刀具材料	工件材料	车　削		铣　削		钻削	备　注
		粗加工	精加工	粗加工	精加工		
高速钢	碳钢、合金钢、铝			○	○	○	
粉末高速钢	碳钢、合金钢、铝				○		
硬质合金（WC-Co 系）	铸铁、有色金属、非金属、难切削材料	○	○	○	○	○	
硬质合金（WC-TiC-Co 系）	钢、不锈钢、耐热钢	○	○	○	○	○	
金属陶瓷	钢、铸铁		○		○		
陶瓷	铸铁		○		○		
涂层高速钢	碳钢、合金钢、铝			○	○	○	
CVD 涂层硬质合金	各种工件材料	○	○	○	○	○	一般比 PVD 更适用于高速切削
金刚石涂层硬质合金	有色金属、非金属	○	○	○	○	○	
PVD 涂层硬质合金	各种工件材料	○	○	○	○	○	一般比 CVD 耐破损性优异
DLC 涂层硬质合金	铝、铜	○	○	○	○	○	
CBN 烧结体	淬火钢、铁系烧结合金、铸铁		○		○		
金刚石烧结体	有色金属、非金属		○		○	○	

注：○表示适合的加工方式。

第四节　刀具种类及使用特点

一、铣刀

铣削加工是数控加工的主要方法之一。铣刀的种类繁多，但从铣削原理看可以概括为端铣和周铣两类，其中典型刀具有面铣刀和圆柱平面铣刀两类。按照刀具的形式及切削原理，面铣刀的主要切削形式就是端铣；而立铣刀主要用于周铣。

铣刀加工有以下特点：

1）为断续切削，易产生冲击和振动。刀齿切入与切出工件的瞬间，由于同时工作的刀齿数目的增减，将产生冲击和振动。当振动频率与机床的固有频率一致时，将会发生共振，容易造成刀齿崩刃，甚至损坏机床零部件。另外，由于切削深度的周期变化而导致切削的波动也会引起振动。

2）为多刃切削，切削效率高。铣刀是一种多刃刀具，同时工作的齿数多，且无空行程，故切削效率较高。

1. 顺铣与逆铣

在加工中，铣刀的旋转方向一般是不变的，但进给方向是变化的。就出现了铣削加工中常见的两种现象：顺铣与逆铣。

（1）顺铣与逆铣的定义

1）顺铣：铣刀与工件接触部位的旋转方向与工件进给方向相同，如图2-6-21a所示。

2）逆铣：铣刀与工件接触部位的旋转方向与工件进给方向相反，如图2-6-21b所示。

（2）逆铣与顺铣的特点

1）逆铣开始时刀齿开始接触工件及以后的一段距离内不能切下切屑，最初只是在摩擦工件表面，而随着刀具的旋转，刀齿切入工件越来越多，在切削结束时切屑的厚度增大到最大值。逆铣对被加工工件会产生一个挤压、摩擦和啃刮的过程，这一过程会在工件上产生加工硬化层，导致刀具的磨损加剧，同时产生周期性振动。

2）顺铣切入工件时的切削深度最大，随后逐渐减小。避免了逆铣切入工件时的挤压、摩擦和啃刮的现象，而且刀齿的切削距离短，铣刀磨损较小，刀具寿命可比逆铣提高2～3倍，已加工表面的质量也较好。特别是铣削有硬化趋势的难加工材料效果更明显。

（3）顺铣、逆铣的应用　顺铣相比于逆铣虽然优点明显，但是在有些情况下使用顺铣时会产生一些问题。

比如在进给丝杠与丝杠螺母间有间隙时，丝杠带动工作台运动过程中会产生运动的反向间隙，如图2-6-21所示（注意图上丝杠间隙的方向）。而顺铣时刀尖运动方向与工件和丝杠的方向一致，此时刀具的切削力会导致工作台向丝杠有间隙的方向发生位移，这种在丝杠、螺母机构间隙范围内的位移称为窜动或称爬行现象。这种现象不但会降低已加工表面质量，甚至会引起“打刀”现象发生。因此采用顺铣时，必须消

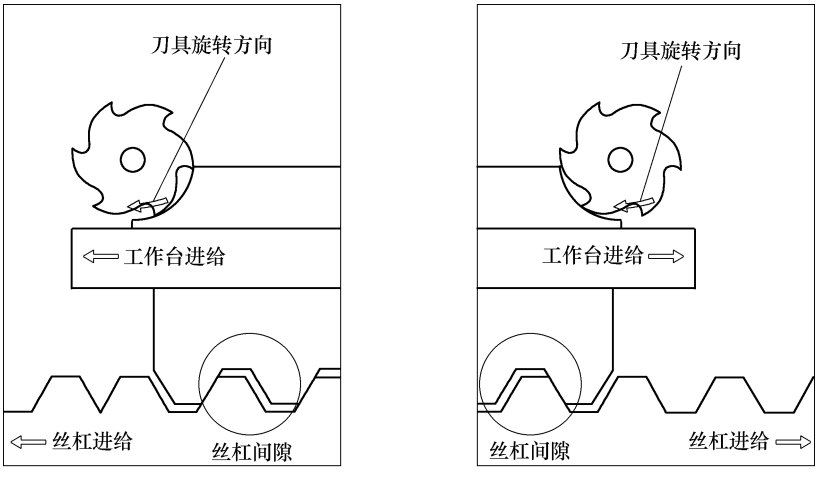


图 2-6-21　顺铣与逆铣

a）顺铣　b）逆铣

除进给机构的间隙；还有另外一种情况，就是工件待加工表面有硬皮，而顺铣切削时刀尖是从工件外切入工件的，如此顺铣时就容易发生刀齿崩刃的现象。如果加工中存在这两种情况，最好还是使用逆铣的好。

2. 提高铣削精度与表面质量的注意事项

影响铣削加工质量的因素很多，包括工艺的设计、刀具的选择、走刀轨迹、切削用量，干、湿切削等。以下从刀具方面介绍提高铣削精度与表面质量的注意事项。

刀具材料对已加工表面质量的影响与材料的摩擦因数、抗黏结能力、耐磨性及刃磨质量有关。

在加工中刀具与工件的摩擦因数低，有利于降低切削力，在切削较软黏的材料时应该使用较锋利的刀具，这样能减少切削力，便于形成较好的加工精度和表面质量；硬质合金刀具的耐磨性较好，在较高的切削速度下，切削刃仍能较长时间保持锋利，因而可以获得较小的表面粗糙度值；涂层硬质合金和陶瓷刀具在高温时，刀面上能形成氧化膜，使刀具与加工表面的摩擦因数减小，且有较高的抗黏结能力，能有效地抑制积屑瘤和鳞刺，因此有利于减小表面粗糙度值；PCNB 和 PCD 刀具的耐磨性更高，切削刃能持久保持锋利，在高速精加工中，已加工表面的表面粗糙度值可以达到 $Ra0.05 \sim 0.1\mu m$，甚至可以达到镜面粗糙度。

3. 面铣刀

（1）面铣刀的分类　面铣刀是在加工中心中用于加工台阶面和平面的铣刀。面铣刀是多齿刀具，生产效率较高。面铣刀按照结构可分为整体焊接式和机卡可转位面铣刀两种。由于整体焊接面铣刀难以保证焊接质量，刀具寿命短，重磨较费时，目前已被机卡可转位面铣刀取代。所以在后文中主要以机卡可转位面铣刀作为重点。面铣刀

的常见形式见表 2-6-11。

表 2-6-11　面铣刀常见形式

	面铣刀分类		特　　点
按刀片安装方向分	平装结构		平装结构铣刀的刀体结构工艺性好，容易加工，并可采用无孔刀片。 切削力方向的硬质合金截面较小，故平装结构的铣刀一般用于轻型和中量型的铣削加工
	立装结构		由于刀片依靠切削力夹紧，夹紧随切削力的增大而增大，因此可省去夹紧元件，增大容屑空间。由于刀片切向安装，在切削力方向的硬质合金截面较大，因而可进行大切削深度、大走刀量切削，这种铣刀适用于重型和中量型的铣削加工
按刀齿密度分	粗齿轮面铣刀		适用于机床的大余量加工和软材料或切削宽度较大的铣削加工；当机床功率较小时，为使切削稳定，也常选用粗齿铣刀
	密齿面铣刀		适用于精密高效加工，但密齿铣刀对机床的功率要求较高，对机床、夹具、工件、刀柄的刚性要求较高，不适合系统刚性较差时的加工
特殊性能刀具	拉刀式面铣刀		1）不用对刀，换刀片操作方便 2）表面质量高 3）没有毛刺、翻边

机卡可转位面铣刀的直径已经标准化，采用公比为 1.25 的数列的标准直径：16、20、25、32、40、50、63、80、100、125、160、200、315、400、500、630（单位：mm）。

（2）面铣刀角度的几何特点　将面铣刀的每个刀齿当做一把普通外圆车刀。在计算刀具的角度时机卡可转位面铣刀的几何角度，是刀体上刀槽的几何参数和刀片的几

何参数共同形成的。

面铣刀各角度如图 2-6-22 所示。

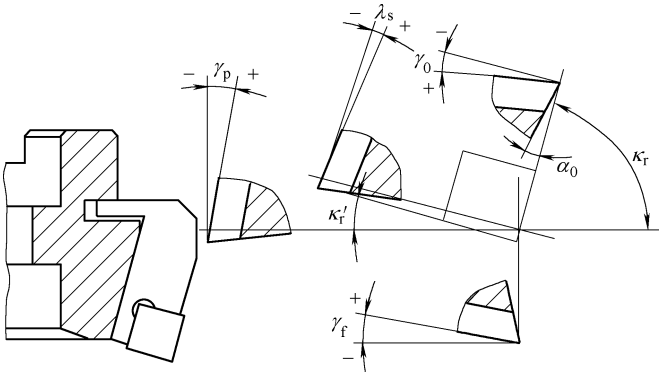


图 2-6-22　面铣刀角度

1）前角（γ_o）。面铣刀的前角主要根据工件材料选择，但也应综合考虑排屑性。

铣刀的前角可分解为径向前角 γ_f 和轴向前角 γ_p，径向前角 γ_f 主要影响切削功率；轴向前角 γ_p 则影响切屑的形成和进给力的方向，当 γ_p 为正值时切屑飞离加工面。

采用双负型刀片抗冲击能力强，适用于粗铣铸钢、铸铁和高硬度、高强度钢。但铣削功率消耗大，需要极好的工艺系统刚性，如图 2-6-23 所示。

采用双正前角刀片，刀尖锋利性好、切削轻快，排屑顺利但切削刃强度较差。适用于加工软材料和不锈钢、耐热钢、普通钢和铸铁等。在小功率机床、工艺系统刚性不足以及有积屑瘤产生时应优先选用该形式，如图 2-6-24 所示。

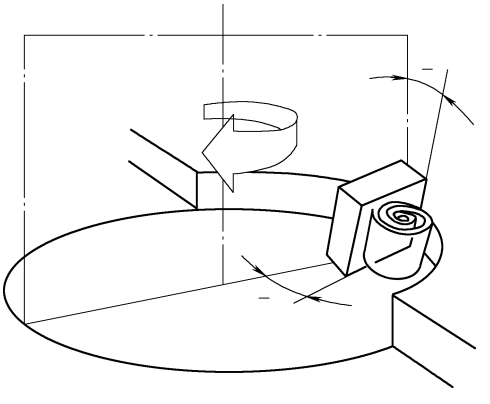


图 2-6-23　双负型刀片

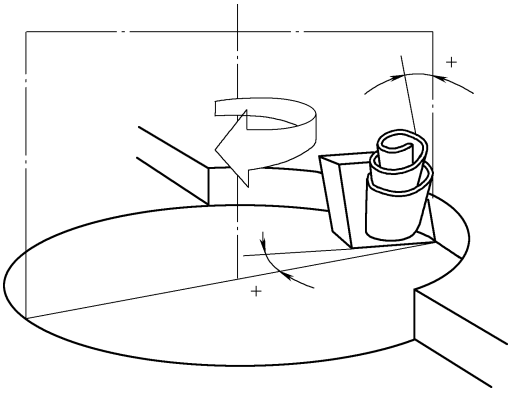


图 2-6-24　双正前角刀片

采用正负前角切削刃抗冲击性能较强，切削刃也较锋利。适用于加工钢、铸钢和铸铁。大余量铣削时，效果也较好，如图 2-6-25 所示。

硬质合金刀具强度低，脆性大，从刀具强度考虑，前角应比高速钢刀具小些。无论是铣削塑性材料还是脆性材料，当其硬度较高时，硬质合金刀具的前角宜取负值，

当采用负倒棱改善刃口强度，前角也可以适当大些。铣削是断续切削，刀齿切入、切出时均受到冲击，因此硬质合金铣刀的前角比车刀要小些。

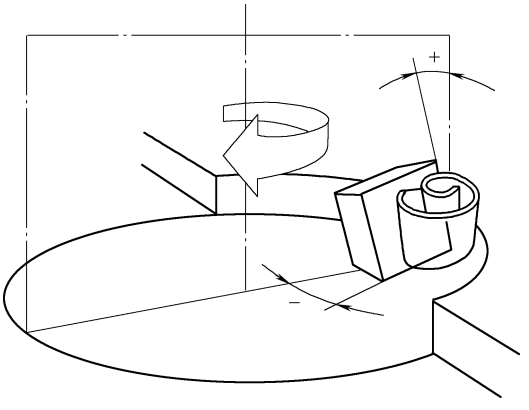


图 2-6-25　正负前角

2）后角（α_o）。后角的作用是减轻后刀面与工件上过渡面的摩擦。铣刀的后角主要根据切削深度选择，切削深度越小，后角值越大。由于铣削时的切削深度比车削时小，所以铣刀的后角比车刀大。同时工件材料对后角的选择也是有影响的，工件材料强度、硬度越高、变形系数小就可以使用较小的前角；而塑性大的材料，变形系数大宜使用较大的前角。由于铣削时的切削深度小，铣刀的磨损主要发生在后刀面，因此铣刀的磨损标注主要就是看后刀面的磨损情况。

3）余偏角。余偏角（ψ_r）是一个换算出的角度，$\psi_r = 90° -$（κ_r）主偏角。在切削深度与每刃进给量（f_z）一定的情况下，如图 2-6-26 所示，ψ_r 越大，切削层厚度 h 越薄，则单位切削刃长度承受的切削力越小，刀具寿命越长。同时 ψ_r 的变化也使切削力的方向发生变化，角度越大产生的进给力也就越大，背向力就越小。而径向切削力的大小直接影响切削功率和刀具的抗振性能。铣刀的余偏角越大，其抗振性也越好。

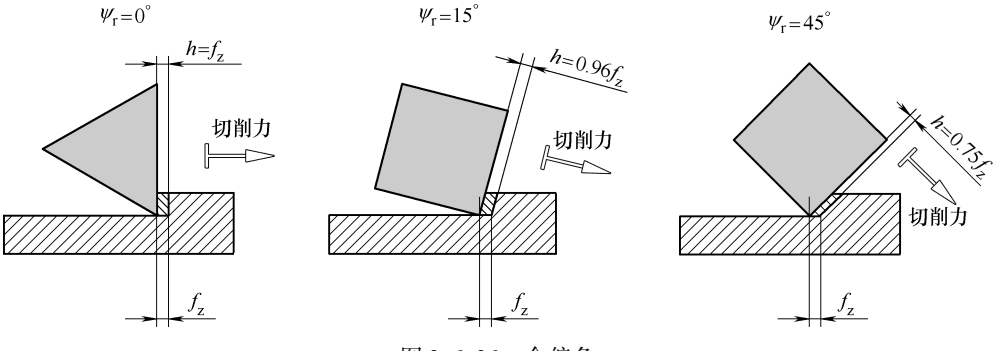


图 2-6-26　余偏角

可转位铣刀的主偏角主要有 90°、88°、75°、60°和 45°等。

可转位铣刀刀片的形状除常见的三角形、四角形以外，还有五角形、六角形、长方形和圆形等。多角形刀片可使用的刃数增加，但与相同内接圆的刀片相比，各切削刃会变短。

（3）刀具直径与加工位置的选择　如图 2-6-27 和图 2-6-28 所示为面铣刀相对于工件的加工位置。其中，图 2-6-27 所示的使铣刀的中心位于工件内侧的加工是比较好的方法。

对称铣削时（图 2-6-27a），选择刀具直径为工件宽度的 1.2～1.3 倍。

工件的宽度比刀具直径大时（图 2-6-27b、c），分 2～3 次进行加工，但是要将刀具的中心安装于工件的内侧。

使用比工件大很多的大直径面铣刀时（图 2-6-27d），加工时应使尽可能多的切削刃同时参与工件的切削。

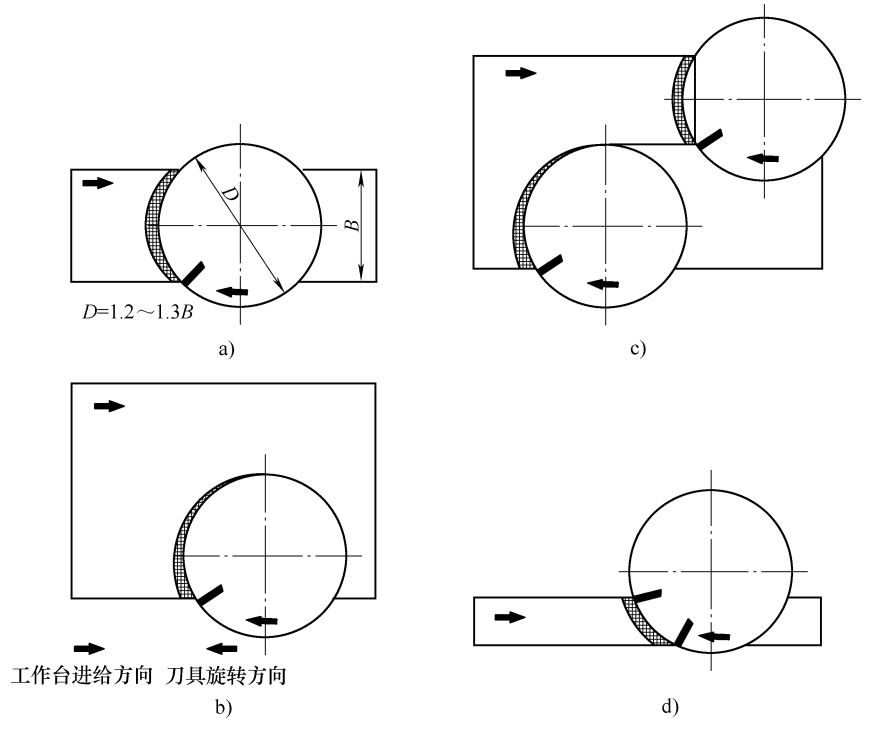


图 2-6-27　刀具直径与加工位置的选择

效果不好的切削方法如图 2-6-28 所示。刀具直径等于或小于工件的宽度。这种情

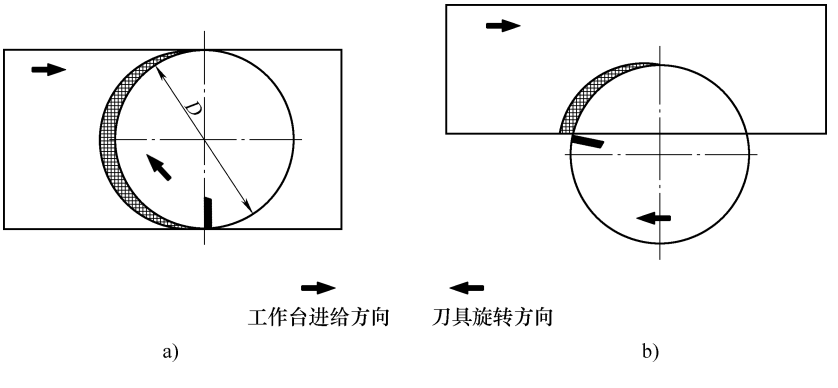
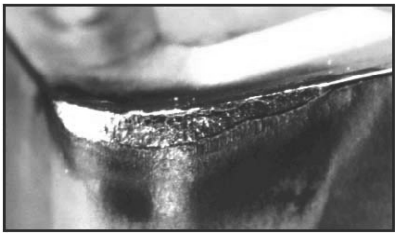
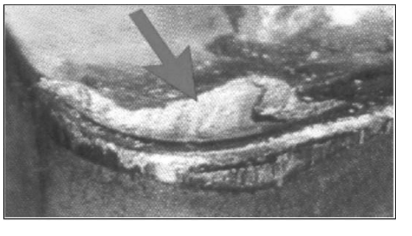
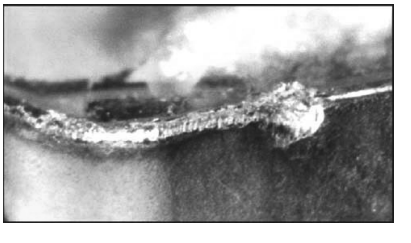
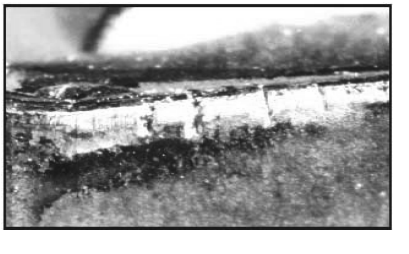


图 2-6-28　效果不好的切削方法

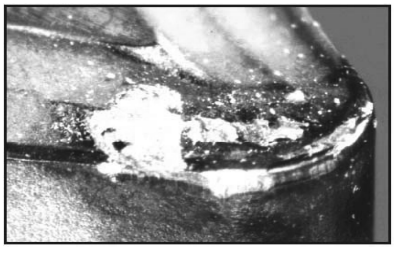
况下，切削加工的初期接触从零点开始，导致切削刃与工件之间发生摩擦，引起早期磨损。图 2-6-28b 所示的铣刀的中心位于工件外侧，切削刃总是从顶端开始接触工件，因此切削刃易发生破损。

（4）切削刃的损伤及对应措施（表 2-6-12）

表 2-6-12　切削刃的损伤及对应措施

损伤形式	损伤效果图	对应措施
后刀面磨损		降低切削速度 逐步加大进给量 采用更耐磨的刀片材料或涂层 充足的切削液 采用顺铣的方法
月牙洼磨损		降低切削速度 采用更耐磨的刀片材料或涂层 避免积屑瘤 减小进给量
沟槽磨损		采用更耐磨的刀片材料或涂层 降低切削速度 改变切削深度 采用小主偏角铣刀
热裂		充足的持续的切削液 降低切削速度 逐步加大进给量 采用更耐磨的刀片材料或涂层 采用顺铣的方法

（续）

损伤形式	损伤效果图	对应措施
刃口崩碎或打刀		刃口被挤碎时应提高切削速度
		工件材质不均时降低切削速度并且加大进给量
		查看刀体是否退火失效，刀垫是否破碎；或查看刀片螺钉是否需要更换
		采用韧性更好的刀片材料
		换刃口刚性好的刀片
		加工冷硬铸铁工件时需采用负前角铣刀
		可采用圆刀片铣刀（最耐冲击）
积屑瘤		提高切削速度
		逐步加大进给量直到切屑达到最佳的厚度
		采用物理涂层的刀片材料
		充足的高压切削液或空气防止二次切屑
		正前角铣刀体和刀片

4. 立铣刀

立铣刀是外周与端面均有切削刃的具有细长柄部的铣削刀具，各切削刃可以同时参与切削，也可单独进行切削。立铣刀用于侧面加工、槽加工等广泛的加工领域。

立铣刀的主流曾是高速钢整体立铣刀，而现在随着涂层技术与刀具材料技术的进步，涂层硬质合金整体立铣刀与可转位立铣刀逐渐普及，广泛应用于模具、高硬度材料、难加工材料等加工领域。

（1）顺铣与逆铣对加工的影响　整体立铣刀在加工时，一般轴向切削深度偏大，径向切削深度较小，这是面铣刀所达不到的。因此立铣刀加工属于不稳定、易产生高频振动的加工。可以将立铣刀想象成加长了轴向切削刃的面铣刀，所以它一般也采用顺铣的切削方式，它与面铣刀在选择顺逆铣时有很多相似的特性：当机床的进给机构有间隙时也应该使用逆铣，工件表皮硬度较大时用逆铣也能防止刀齿崩刃。但正是由于立铣刀较长的切削刃，它与面铣刀相比在顺逆铣时有一些不利的倾向。

在立铣刀铣侧面加工时会有歪斜的情况发生。顺铣状态下，受切削力的影响，立铣刀会向工件大的反方向发生挠曲，立铣刀的挠曲会使工件的加工面产生歪斜，如图 2-6-29所示。

逆铣时立铣刀也会受切削力的影响而产生挠曲，它的挠曲方向是咬入工件的方向，其结果是加工面会产生起伏的谷部。其挠曲量在底刃离开工件前的瞬间最大，因此切削刃的 *A* 部分加工位置为谷部，如图 2-6-30 所示。

因此槽加工的加工面会向逆铣一侧倾斜，如图 2-6-31 所示。

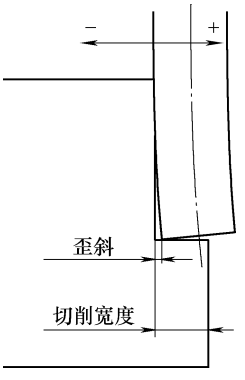


图 2-6-29　立铣刀加工发生挠曲变形

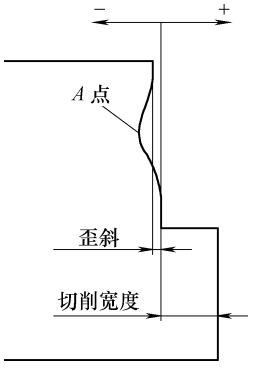


图 2-6-30　立铣刀加工发生挠曲变形

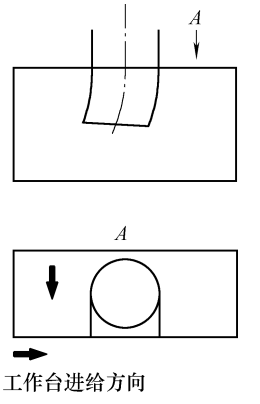


图 2-6-31　立铣刀加工发生挠曲变形

（2）立铣刀的各结构参数对其功能的影响

1）外径。立铣刀外径越大，其在相同切削条件下发生挠曲变形越小，一般直径增大一倍，立铣刀的挠曲量变为原刀具的 1/16。在切削深度增大时，切削力会增大，立铣刀容易产生挠曲变形，因此应在不影响切削条件的前提下尽量使用大直径的刀具。

2）刃长。通常在选用立铣刀时，刃长都应大于加工部位的长度，但长度越长对刀具的刚性越不利。因为切削刃越长意味着切削槽也就越长，而切削槽的截面积小于刀具刀柄的截面积，其刚性较刀柄部分差。

3）螺旋角。螺旋角是立铣刀的轴线与螺旋状切削刃所形成的夹角，在外周则是外周刃的轴向刃倾角。螺旋角越大意味着刀具外周的前角就越大，刀具就越锋利，切削时就会更轻快。

但较大的螺旋角会产生较大的进给力，在加工薄板工件或垂直方向刚性不足的工件时，容易发生工件挠曲变形或高频振动，从而影响加工质量。大的螺旋角导致切削力减小，也使加工表面的表面粗糙度值显著变小，因此作为精加工用的立铣刀的螺旋角比较大。螺旋角还会影响刀具寿命。增大螺旋角，切削刃的接触长度会增加，可减少刀具磨损，但过大的螺旋角会导致刃部强度降低，对刀具产生不利的影响。

4）刃数。刃数越多，每转进给量越大，加工效率会越高。如刀具到达寿命的切削长度增大，也就等于延长了刀具寿命。但是刃数增加后，切削刃间的间隙减小，排屑性能随之变差。而且同时参与切削的刃数增加也会提高切削力。而排屑不畅，容易使立铣刀的切削刃与切屑咬在一起，影响加工精度，还可能造成切削刃的损毁。因此如果打算采用大的切削深度，最好选用刃数少的立铣刀。

5. 键槽铣刀

键槽铣刀如图 2-6-32 所示，它有两个刀齿，圆柱面和端面都有切削刃，一个端面切削刃延伸至中心，既像立铣刀，又像钻头。由于键槽铣刀的结构特点，加工时先轴

向进给达到槽深，然后沿着键槽方向铣出键槽全长。键槽铣刀主要用于加工圆头封闭键槽，一般也常将其当两刃立铣刀来使用。

6. 波纹铣刀

波形刃立铣刀是在普通立铣刀的螺旋前刀面的基础上，用专用铣夹具将螺旋前刀面再加工成波浪形螺旋面，它与后刀面相交成波浪形切削刃，如图 2-6-33 所示。相邻两波形刃的峰谷沿轴线错开一定距离，使切削宽度显著减小，而切削刃的实际切削深度约增大三倍，形成的切屑窄而厚，降低了切削变形程度，并使切削刃避开表面硬化层而切入工件。波形刃使切削刃各点刃倾角、工作前角以及承担的切削负荷均不相同。而且波形刃使同一端截面内的齿距也不相同。这些因素大大减轻了切削力变化的周期性，使切削过程较平稳。铣削气割钢板等表面粗糙的工件时，波形刃立铣刀更能显示出其优良的切削性能。

图 2-6-32　键槽铣刀

图 2-6-33　波纹铣刀

7. 铣刀的切削用量参考值（表 2-6-13、表 2-6-14）

表 2-6-13　铣削速度参考值

工件材料	硬度/HBW	铣削速度/v_c/m·min^{-1}	
		高速钢铣刀	硬质合金铣刀
钢	< 225	18 ~ 42	66 ~ 150
	225 ~ 325	12 ~ 36	54 ~ 120
	325 ~ 425	6 ~ 21	36 ~ 75
铸铁	< 190	21 ~ 36	66 ~ 150
	190 ~ 260	9 ~ 18	45 ~ 90
	160 ~ 320	4. 5 ~ 10	21 ~ 30

表 2-6-14　铣刀每齿进给量 f_z

工件材料	每齿进给量 f_z/mm			
	粗铣		精铣	
	高速钢铣刀	硬质合金铣刀	高速钢铣刀	硬质合金铣刀
钢	0. 10 ~ 0. 15	0. 10 ~ 0. 25	0. 02 ~ 0. 05	0. 10 ~ 0. 15
铸铁	0. 12 ~ 0. 20	0. 15 ~ 0. 30		

二、镗刀

镗刀是应用广泛的孔加工刀具，尤其是加工零件上的直径较大的孔及有位置精度要求的孔和孔系。

常见的镗刀的类型按照切削刃数量可分为单刃镗刀、双刃镗刀和多刃镗刀；按工件的加工表面特征可分为通孔镗刀、不通孔镗刀、阶梯孔镗刀和端面镗刀等。

1. 粗镗刀

可调式双刃镗刀通过改变两切削刃之间距离，实现对不同直径孔的加工。采用一定的机械结构可以调整两刀片之间的距离，从而使一把刀具可以加工不同直径的孔，并可以补偿刀具磨损的影响，如图 2-6-34 所示。

2. 精镗刀

（1）微调镗刀　图 2-6-35 所示为微调镗刀。它具有调节尺寸容易、调节精度高等优点，主要用于精镗孔。

图 2-6-34　粗镗刀

图 2-6-35　微调镗刀

（2）浮动镗刀　其特点是镗刀块自由地装入镗杆的方孔中，不需卡紧，通过作用在两个刃上的切削力来自动平衡其切削位置，因此它能自动补偿刀具安装时产生的误差、机床主轴偏差而造成的加工误差，能获得较高的孔的直径尺寸精度（IT6 ~ IT7），但它无法保证孔的直线度误差和位置误差，因而要求预加工孔的直线度高，表面粗糙度值不大于 $Ra3.2\mu m$，浮动镗与双刃镗刀的比较如图 2-6-36 所示。

3. 镗刀的使用技巧

刀具安装时，要特别注意清洁。镗孔刀具无论是粗加工还是精加工，在安装和装配的各个环节，都必须注意清洁。刀柄与机床的装配，刀片的更换等，都要擦拭干净，然后再安装或装配。

单刃镗刀的刚性差，切削时易引起振动，所以镗刀的主偏角 κ_r 选得较大，以减小径向切削力，图 2-6-37 所示的是机夹式通孔单刃镗刀。镗铸件或精镗时，一般取 $\kappa_r = 90°$；粗镗钢件孔时，取 $\kappa_r = 60° \sim 75°$，以提高刀具的耐用度。为避免工件材质不均等原因造成扎刀现象以及使刀头底面有足够支撑面积，往往需要使镗刀刀尖高于工件中

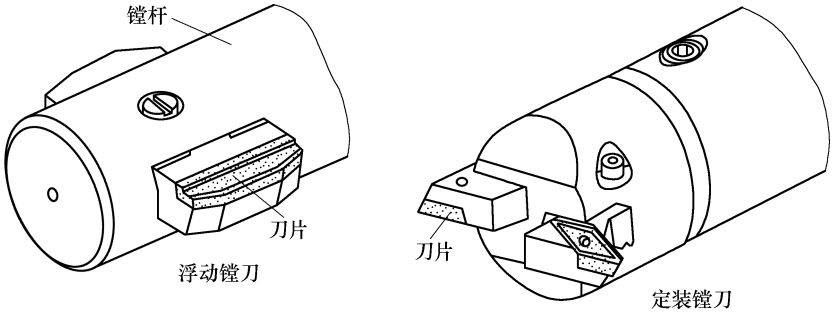


图 2-6-36　浮动镗刀与定装镗刀

心 $\Delta h = 1/20D$（D 为工件孔的直径）或更大些，使切削时镗刀的工作前角减小，工作后角增大，所以在选择镗刀头的前角、后角时要相应地增大前角，减小后角。

单刃镗刀的 L/D（长径比）一般都较大，所以在工件试加工前，最好使用一块与待加工工件相同的材料进行试验加工，以确定刀具镗出的孔的尺寸。即使使用对刀仪器对刀也会由于加工工件的硬度、排屑、切削液的情况不同而影响加工孔的尺寸精度。

双刃镗刀的安装尽量做到一个切削刃高一个切削刃低，而且一般高位安装刀片的回转直径应小于低位安装刀片；这样不但能减小每个刃的切削深度，减小切削力，同时减小产生共振的概率。

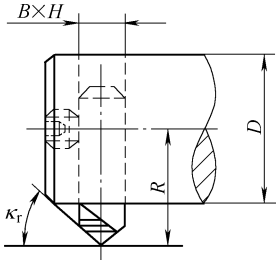


图 2-6-37　机夹式通孔单刃镗刀

4. 镗刀的切削用量参考值（表 2-6-15）

表 2-6-15　镗孔切削用量参考值

工序	刀具材料	工件材料 / 切削用量	铸铁		钢及合金钢		铝及其合金	
			v_c/（m/min）	f/（mm/r）	v_c/（m/min）	f/（mm/r）	v_c/（m/min）	f/（mm/r）
粗镗	高速钢	硬质合金	20～25 35～50	0.4～1.5	15～30 50～70	0.35～0.7	100～150 100～250	0.5～1.5
半精镗	高速钢	硬质合金	20～35 50～70	0.15～0.45	15～50 95～135	0.15～0.45	100～200	0.2～0.5
精镗	高速钢	硬质合金	70～90	D1 级 <0.08 D 级 0.12～0.15	100～135	0.12～0.15	150～400	0.06～0.1

注：当采用高精度等级的镗刀镗孔时，由于余量较小，直径余量不大于 0.2mm，切削速度可提高一些，铸铁件为 100～150m/min，钢件为 150～250m/min，铝合金为 200～400m/min，巴氏合金为 250～500m/min。进给量可在 0.03～0.1mm/r 范围内。

三、钻头

1. 钻头

钻头是在实体材料上加工孔的刀具，它是由具有顶端部分的切削刃与刀体部分的排出切屑用槽等部分构成的，根据形状、材料、结构、功能等的不同，钻头分为很多种类。例如：中心钻、麻花钻、U 钻及深孔钻等。

2. 中心钻

中心钻是用于轴类等零件端面上的中心孔加工，用于孔加工的预制精确定位，引导麻花钻进行孔加工，减少误差的钻头，它实质上是由螺旋角很小的麻花钻和锪钻复合而成，如图 2-6-38 所示。

3. 麻花钻

在钻头中使用量最大的就是麻花钻，它是一种粗加工刀具，其常用规格为 ϕ0.1 ~ ϕ80mm。按柄部形状分为直柄麻花钻和锥柄麻花钻，按制造材料分为高速钢麻花钻和硬质合金麻花钻。

（1）麻花钻的结构　主要由柄部和工作部组成。工作部的切削部有两个主切削刃和副切削刃，两个前刀面和后刀面，两个刃带和一个横刃组成，担负全部切削工作。工作部分的导向部分起导向和备磨作用，容屑槽做成螺旋形以利排屑，如图 2-6-39 所示。

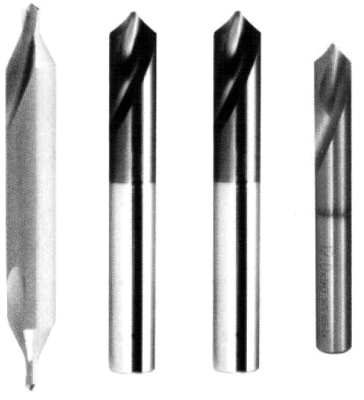


图 2-6-38　中心钻

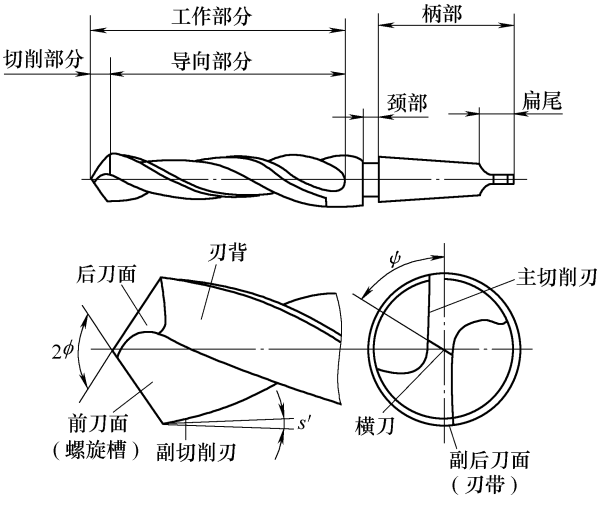


图 2-6-39　麻花钻的结构

（2）麻花钻的主要结构参数对其功能的影响

1）螺旋角 β 是钻头螺旋槽相对于轴向的倾斜角度（在钻头外周部分的螺旋角与前角相等），一般情况下，螺旋角约为 30°。小于 30°的螺旋角成为弱螺旋角，它的螺旋线长度短，排屑性能良好，但是前角小，切削力会增大。螺旋角大于 30°的称为强螺旋

角，强螺旋角的前角大，切削力会降低，同时切削刃的刃角部分比较锋利，因此容易发生崩刃、破损现象，如图 2-6-40 所示。β、d 和 P 的关系如下：

$$\tan\beta = \pi d/P$$

式中 P——螺旋槽导程（mm）；

d——钻头外径（mm）。

2）槽长对加工的孔的精度与钻头的寿命影响很大。需要的槽长由孔的深度、重磨量来决定，但槽的长度增大，相应地钻头的长度也会增大，钻头本身的刚性会降低。刚性比较低的钻头在切入工件时，会发生强烈的振摆，旋转中心无法固定，因此对孔精度与刀具寿命会造成不好的影响。所以最好选择槽长尽可能短的钻头。

3）顶角 2ϕ 如图 2-6-39 所示，顶角越小，则主切削刃越长，切削宽度增加，单位切削刃上的负荷减轻，轴向力减小，这对钻头轴向稳定性有利。且外圆处的刀尖角增大，有利于散热和提高刀具寿命。但顶角减小会使钻尖强度减弱，切削变形增大，导致扭矩增加。例如：在切削进给 f_r（每转进给量）一定的情况下，顶角较小时，切削刃在垂直方向的切削量变薄，顶角较大时，切削量就会变厚，因此切削深度增加。防止切屑在钻头缠绕的方法就是增大顶角，使切屑容易折断。标准麻花钻的顶角 2ϕ 为 118°。顶角的大小对切屑厚度有影响。

4）心厚 d_c 如图 2-6-41 所示。心厚与钻心锥度、槽宽比一样，是决定钻头剖面形状的重要因素。心厚较大时，可提高钻头的刚性，但是槽面积缩小，排屑变得困难。同时，切削力的轴向力变大，对钻头整体都会产生影响。这是因为随着心厚的增加，顶端心厚部分的横刃变长，发生挤压的方位扩大，进给力也会增加。实际使用中为了减少进给力，需要进行横刃修磨来缩短横刃。

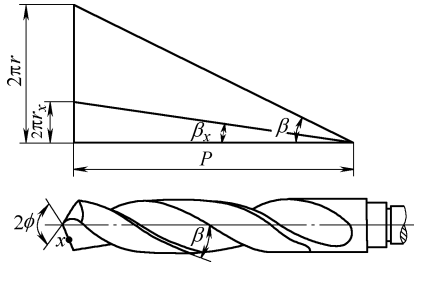


图 2-6-40　螺旋角 β

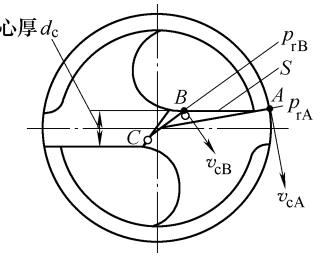


图 2-6-41　心厚 d_c

5）韧带宽度如图 2-6-39 所示。考虑到钻头的导向性与摩擦力，刃带宽设定为钻头直径的 6%～10%。深孔加工用长钻头与空内壁的摩擦长度大，因此它的刃带宽度较小，目的是降低摩擦力。为了提高加工孔的圆度与降低表面粗糙度值，也有通过增大刃带宽度来提高辊光效果的钻头。

6）钻头的前角（轴向）与螺旋角有关，螺旋角越大，前角也就越大。实际的前角大小会受到切削刃的影响，但在钻头外周部分的螺旋角与前角是相等的，而越靠近钻头中心处，前角越小。

7）钻头的后角。为了不妨碍钻头的进给运动，在切削刃的后刀面设有后角。后角一般设定为7°～15°。增大后角，工件与后刀面的接触部分就会减小，进给力会降低，但容易发生崩刃、破损。

（3）麻花钻的切削用量参考值（表2-6-16、表2-6-17）

表2-6-16　高速钢钻头加工铸铁时的切削用量参考值

钻头直径/mm	材料硬度					
	160～200HBW		200～400HBW		300～400HBW	
	切削用量					
	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}
1～6	16～24	0.07～0.12	10～18	0.05～0.1	5～12	0.03～0.08
6～12	16～24	0.12～0.2	10～18	0.1～0.18	5～12	0.08～0.15
12～22	16～24	0.2～0.4	10～18	0.18～0.25	5～12	0.15～0.2
22～50	16～24	0.4～0.8	10～18	0.25～0.4	5～12	0.2～0.3

注：采用硬质合金钻头加工铸铁时取 v_c = 20～30m/min。

表2-6-17　高速钢铰刀铰孔时的切削用量参考值

钻头直径/mm	工件材料					
	铸　铁		钢及合金钢		铝铜及其合金	
	切削用量					
	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}
6～10	2～6	0.3～0.5	1.2～5	0.3～0.4	8～12	0.3～0.5
10～15	2～6	0.5～1	1.2～5	0.4～0.5	8～12	0.5～1
15～25	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.5～0.6	8～12	0.8～1.5
25～40	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.4～0.6	8～12	0.8～1.5
40～60	2～6	1.2～1.8	1.2～5	0.5～0.6	8～12	1.5～2

注：采用硬质合金铰刀加工铸铁时 v_c = 8～10m/min，加工铝时 v_c = 12～15m/min。

4. 可转位浅孔钻（U钻）

图2-6-42所示为硬质合金可转位浅孔钻，适合在数控机床上加工直径为17.5～80mm、L/D（长径比）≤3的中等直径的浅孔。这种结构的钻头不仅加工时消耗功率少，切削效率高，而且可以节约刀具材料，降低加工成本，是中等直径孔大批量生产时常用的方法之一。

图2-6-42　可转位浅孔钻

5. 深孔钻

深孔是指孔的长径比 $L/D \geqslant 5$ 的孔。对长径比在5～20之间的一般深孔，可

以使用直柄和锥柄超长麻花钻。

（1）单刃外排屑深孔钻（枪钻） 当加工直径较小的深孔时，由于孔径的限制，钻头的刚性很差。要保证被加工孔的精度，首先要解决加工过程中的导向问题。单刃外排屑深孔钻是加工中小直径深孔的代表性刀具。用于加工 $d=1\sim35$mm、长径比达 100～250 的深孔，采用枪钻是目前加工小直径（1～6mm）深孔的唯一方法。枪钻如图 2-6-43 所示。

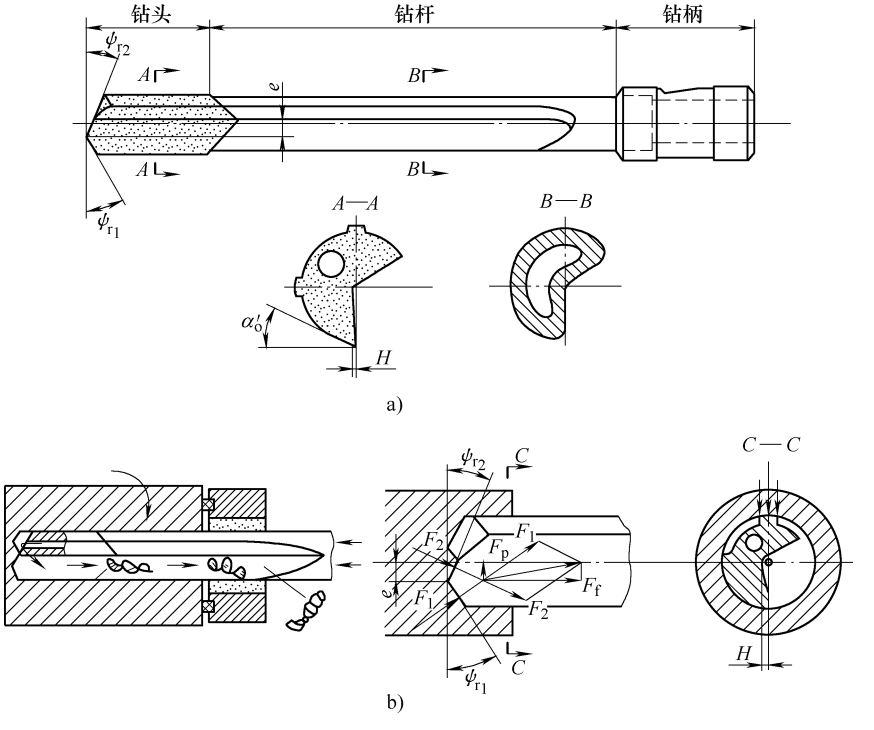


图 2-6-43 单刃外排屑深孔钻

（2）喷吸钻 喷吸钻是针对中等直径的一般深孔的加工而研制的。喷吸钻是一种内排屑深孔钻，它利用切削液的喷吸效应来排屑，故切削液的供液压力可降低（仅为 1～2MPa）。其使用于加工直径 18～180mm、长径比在 16～50（可达 100）的深孔。加工精度等级为 IT10～IT7，加工表面的表面粗糙度值为 $Ra3.2\sim0.8\mu$m，孔的直线度可达到 0.1mm/1000mm。喷吸钻如图 2-6-44 所示。

（3）螺纹刀具 常见的加工中心用螺纹刀具主要是丝锥、螺纹铣刀等。

6. 丝锥

丝锥（图 2-6-45）主要用于加工小孔径的内螺纹，在加工圆柱螺纹和圆锥形螺纹上得到广泛应用。常用的丝锥有：直槽丝锥、螺旋槽丝锥、螺尖丝锥和挤压丝锥等。

1）直槽丝锥通用性最强，通孔或不通孔、有色金属或黑色金属均可加工，价格也最便宜。但是丝锥的针对性也较差，什么都可做，什么都不是做得最好。

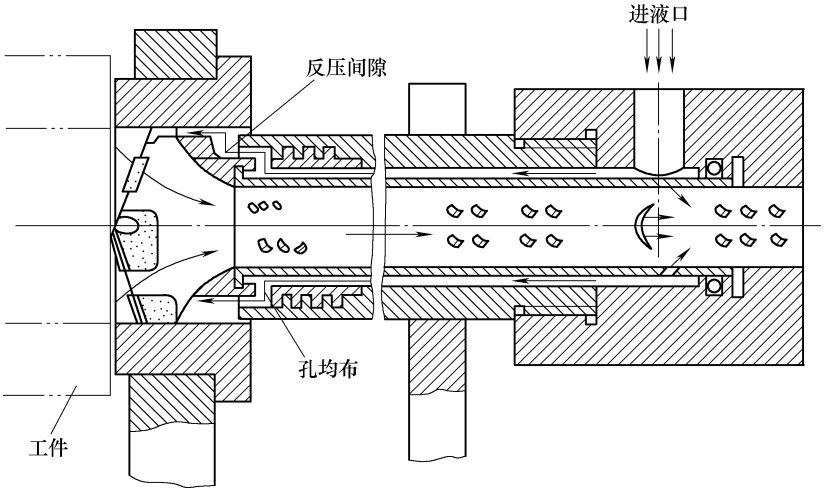


图 2-6-44　喷吸钻

2）螺旋槽丝锥的容屑槽是螺旋状的，根据旋向的不同分为左旋和右旋。左旋螺旋槽丝锥（图 2-6-46 所示靠右的丝锥）在攻螺纹时切屑向下排，适用于加工通孔；右旋螺旋槽丝锥攻螺纹时切屑向上排出，适用于加工不通孔。一般经验是：加工黑色金属的螺旋角选得小一点，一般在 30°左右，保证螺旋齿的强度。加工有色金属的，螺旋角选得大一点，可在 45°左右，这样切削锋利性好一些。

图 2-6-45　丝锥

图 2-6-46　左旋、右旋丝锥比较

普通丝锥攻螺纹切削用量参考值见表 2-6-18。

表 2-6-18　普通丝锥攻螺纹切削用量参考值

加 工 材 料	铸　　铁	钢及其合金	铝及其合金
v_c/m · min^{-1}	2.5 ~ 5	1.5 ~ 5	5 ~ 15

3）挤压丝锥比较适合加工有色金属，挤压丝锥是利用金属塑性变形原理而加工内螺纹的一种新型螺纹刀具，如图 2-6-47 所示。挤压丝锥挤压内螺纹是无屑加工工艺，特别适用于强度较低、塑性较好的铜合金和铝合金等，也可用于不锈钢和低碳钢等硬度低、塑性大的材料攻螺纹。用挤压丝锥挤出的螺纹表面粗糙度值小，螺纹的金属纤

维不断裂，并在表面形成一层冷硬层，可提高螺纹的强度和耐磨性。它从根本上解决了攻螺纹的排屑困难问题，因无切屑，更有利于螺纹的装配。

7. 螺纹铣刀

螺纹铣削加工相比于传统螺纹加工方式有以下优点：螺纹的加工精度、加工效率较传统加工方法有了较大的提高，且加工时不受螺纹结构和螺纹旋向的限制，如一把螺纹铣刀可加工多种不同旋向的内、外螺纹。对于不允许有过渡扣或退刀槽结构的螺纹，采用传统的丝锥攻螺纹方式很难加工，但采用数控铣削却十分容易实现。此外，螺纹铣刀的刀具寿命是丝锥的十多倍甚至数十倍，而且在数控铣削螺纹过程中，对螺纹直径尺寸的调整极为方便，这是采用丝锥、板牙难以做到的。螺纹铣刀如图 2-6-48 所示。

图 2-6-47　挤压丝锥

图 2-6-48　螺纹铣刀

四、铰刀

铰刀是对中小直径孔进行半精加工和精加工的刀具，铰刀的加工余量较小，齿数较多，刚性和导向性好，所以加工精度等级可达到 IT7 ~ IT6，表面粗糙度值为 $Ra1.6 \sim 0.2\mu m$。在铰孔之前，被加工孔需要经过钻孔或钻、扩孔加工。

铰刀的种类很多，根据铰刀的结构不同，可以分为圆柱孔铰刀（图 2-6-49）和锥孔铰刀（图 2-6-50）；根据使用材料不同可分为高速钢铰刀和硬质合金铰刀等。

图 2-6-49　圆柱孔铰刀

图 2-6-50　锥孔铰刀

铰刀的推荐切削参数见表 2-6-19、表 2-6-20。

表 2-6-19　高速钢铰刀铰孔时的切削用量参考值

铰孔直径/mm	工件材料					
	铸　铁		钢及合金钢		铝铜及其合金	
	切削用量					
	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}	v_c/m·min^{-1}	f/mm·r^{-1}
6～10	2～6	0.3～0.5	1.2～5	0.3～0.4	8～12	0.3～0.5
10～15	2～6	0.5～1	1.2～5	0.4～0.5	8～12	0.5～1
15～25	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.5～0.6	8～12	0.8～1.5
25～40	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.4～0.6	8～12	0.8～1.5
40～60	2～6	1.2～1.8	1.2～5	0.5～0.6	8～12	1.5～2

表 2-6-20　整体硬质合金铰刀推荐切削参数

工件材料	碳　钢			合　金　钢			铸　铁			有色金属		
铰刀螺旋角β	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°
切削速度 v_c/m·min^{-1}	15～30			5～20			18～45			70～100		
每齿进给量f_z/mm	0.13～0.25			0.05～0.15			0.1～0.3			0.05		
单边切深/mm	0.1～0.2			0.05～0.15			0.1～0.2			0.2～0.8		

注：1. 余量偏大时，螺旋角应选小；余量偏小时，螺旋角应选大。

2. 采用水基切削液。

五、无屑加工刀具

滚压加工是一种无切屑加工，通过滚压工具向工件表面施加一定压力。在常温下利用金属的塑性变形，使工件表面的微观不平得以辗压平整，从而达到改变表层结构、机械特性、形状和尺寸的目的。因此这种方法可同时达到光整加工及强化两种目的。

与切削加工不同，滚压加工是一种塑性加工。被滚压加工的工件不仅表面粗糙度值瞬间就可以达到 R_y0.1～0.8μm，而且加工面硬化后其耐磨性得到提高的同时，疲劳强度也增加了 30%，因此其具有切削加工所无法达到的优点。由于可简单、低成本地进行零部件的超精密加工，日益被精密机械（以汽车产业为首）、化学和家电等产业广泛采用，展现出很大的优势。

第七章
读 图 知 识

第一节　机械制图的基本知识

机械制图是用图样确切表示机械的结构形状、尺寸大小、工作原理和技术要求的学科。机械图样是根据投影方法并遵照国家标准的规定绘制成的用于产品制造等用途的图，简称图样。图样由图形、符号、文字和数字等组成，是表达设计意图和制造要求以及交流经验的技术文件，是设计、制造、检验、装配产品的依据；是现代工业生产部门、管理部门和科技部门中一种重要的技术资料，被誉为工程技术界的通用语言。

机械图样主要有零件图和装配图，此外还有布置图、示意图和轴测图等。零件图表达零件的形状、大小以及制造和检验零件的技术要求；装配图表达机械中所属各零件与部件间的装配关系和工作原理；布置图表达机械设备在厂房内的位置；示意图表达机械的工作原理，如表达机械传动原理的机构运动简图、表达液体或气体输送线路的管道示意图等。示意图中的各机械构件均用符号表示。轴测图是一种立体图，直观性强，是常用的一种辅助用图样。

一、图线的形式及应用（GB/T 4457.4—2002《机械制图　图样画法　图线》）

1. 机械图样中图线的名称、形式及其在图样上的应用（表 2-7-1）

表 2-7-1　图线的名称、形式及应用

图线名称	图线形式	图线应用
粗实线	———	可见棱边线、可见轮廓线、相贯线、螺纹牙顶线、螺纹长度终止线、齿顶圆（线）、模样分型线、剖面的剖切符号用线、系统结构线（金属结构工程）、表格图、流程图中的主要表示线
细实线	———	过渡线、尺寸线、尺寸界线、指引线和基准线、剖面线、重合断面的轮廓线、短中心线、螺纹牙底线、尺寸线的起止线、表示平面的对角线、零件成形前的弯折线、范围线及分界线、重复要素表示线、锥形结构的基面位置线、叠片结构位置线、辅助线、不连续同一表面连线、成规律分布的相同要素的连线、投影线、网格线

（续）

图线名称	图线形式	图线应用
波浪线		断裂处边界线，视图和剖视图的分界线
双折线		断裂处边界线，视图和剖视图的分界线
细虚线		不可见棱边线，不可见轮廓线
粗虚线		允许表面处理的表示线
细点画线		轴线、对称中心线、分度圆（线）、孔系分布的中心线、剖切线
粗点画线		限定范围表示线
细双点画线		相邻辅助零件的轮廓线、可动零件极限位置的轮廓线、重心线、成形前轮廓线、剖切面前的结构轮廓线、轨迹线、毛坯图中制成品的轮廓线、特定区域线、延伸公差带表示线、工艺用结构的轮廓线、中断线

2. 图线在机械图样中的综合应用示例（图 2-7-1）

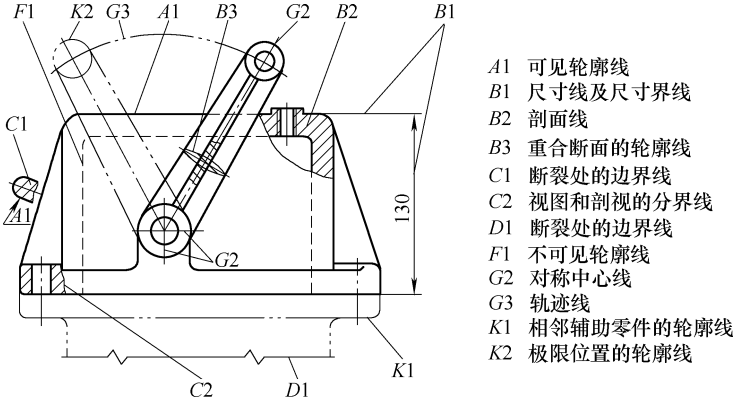


图 2-7-1　图线应用示例

二、图样画法

1. 投影与视图

（1）投影的概念（GB/T 14692—2008《技术制图　投影法》，GB/T 13361—2012《技术制图　通用术语》）　在日常生活中光线照射物体，将在物体后面的墙壁或地面上产生影子，这就是投影。投影法是通过这种现象科学的抽象而建立起来的。

由投射中心（光源）发出的投射线通过物体，向选定的面投射，并在该面上得到图形的方法，称为投影法。根据投影法所得到的图形称为投影。投影法中，得到投影的面称为投影面。所有投射线的起源点叫做投射中心。发自投射中心且通过被表示物体上的各点直线称为投射线。

（2）投影法的分类　根据投射线的类型（平行或汇交），投影法分为中心投影法

和平行投影法；平行投影法根据投影面与投射线的相对位置（垂直或倾斜）又分为正投影法和斜投影法。投影法的分类如图 2-7-2 所示。

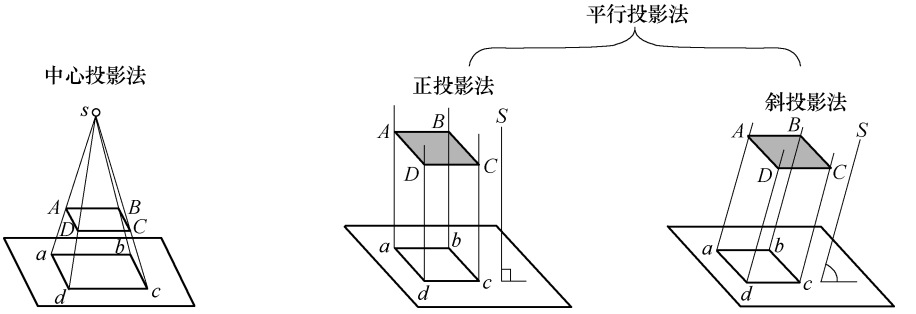


图 2-7-2　投影法的分类

在机械制图中，将物体按正投影法向投影面投射时所得到的投影称为“视图”。物体向基本投影面投射所得的视图，称为基本视图。这时所得到的投影为主视图、俯视图和左视图。

当物体的外部形状比较复杂并在上下、左右、前后各个方向形状都不同时，用三个视图往往不能完整、清晰地把它们表达出来。国家标准 GB/T 17451—1998《机械制图　图样画法　视图》规定，采用正六面体的六个面作为基本投影面，将物体放在其中，分别向六个投影面投射，得到六个基本视图。光线自物体的前面向后投射所得到的投影称为“主视图”，自后向前的称为“后视图”，自上向下的称为“俯视图”，自下向上的称为“仰视图”，自左向右的称为“左视图”，自右向左的称为“右视图”。六个基本视图如图 2-7-3 所示。

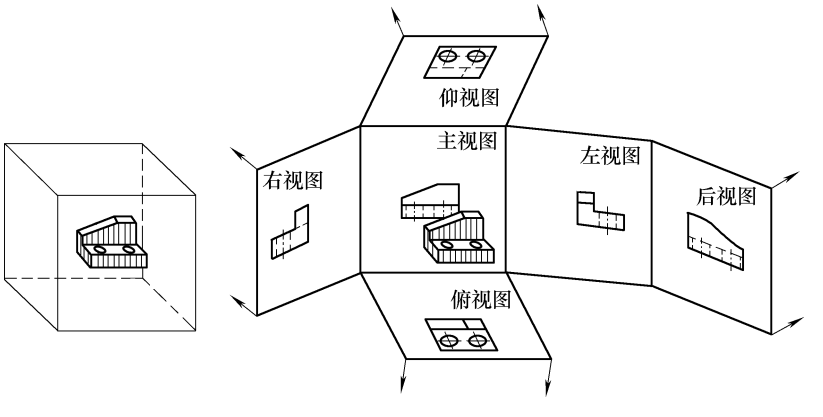


图 2-7-3　六个基本视图

（3）投影分角及第一角画法和第三角画法　笛卡儿直角坐标系将三维空间分为八个分角（也称象限），分别称为第一角、第二角、第三角……，如图 2-7-4 所示。

在国家标准 GB/T 4458. 1—2002 中规定，我国采用第一分角投影法（简称第一角

画法）绘制图样，而有的国家（如美国、加拿大、日本等）则采用第三角投影法（简称第三角画法）。

第一角投影法是将物体置于空间中的第一分角内，使物体处于观察者与投影面之间（即保持“视点（观察者）→物体→投影面”的位置关系），然后按正投影法得到各个视图的画法，即称为第一角画法。也称第一象限法，如图 2-7-5 所示。

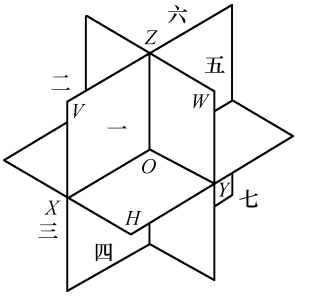


图 2-7-4　笛卡儿直角坐标系

第三角投影法是将物体置于空间中的第三分角内，使投影面处于观察者与物体之间（即保持“视点（观察者）→投影面→物体”的位置关系），然后按正投影法得到各个视图的画法，即称为第三角画法。也称第三象限法，如图 2-7-6 所示。

在我国，不推荐采用第三角投影，合同规定使用第三角投影时也可以使用，但必须在图样中画出第三角投影的识别符号。

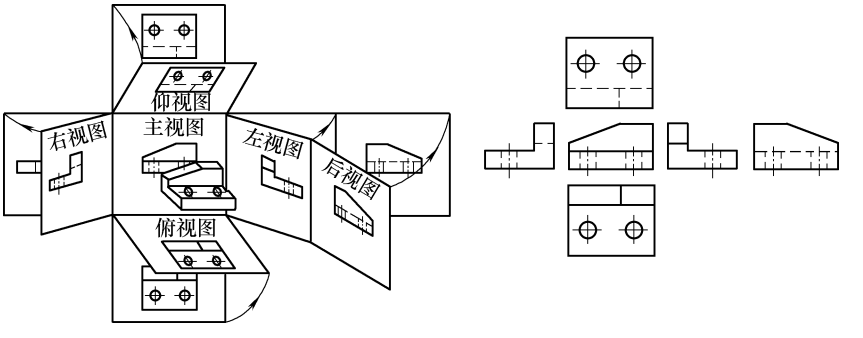


图 2-7-5　第一角画法（识别符号◁）

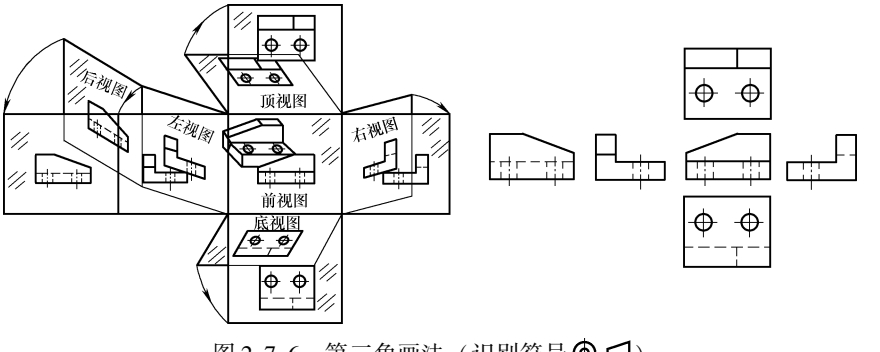


图 2-7-6　第三角画法（识别符号◎◁）

2. 视图的种类（GB/T 17451—1998《技术制图　图样画法　视图》、GB/T 4458. 1—2002《机械制图　图样画法　视图》）

视图主要用于表达物体的外形结构，为完整地表示一个物体的形状，常需要采用两个或两个以上的视图。国家标准 GB/T 17451—1998 规定的视图通常分为基

本视图、向视图、局部视图和斜视图四种，个别部位采用局部放大视图。

（1）基本视图　按第一角画法配置的六个基本视图如图 2-7-7 所示。在同一张图样内按图示配置视图时，可不标注视图名称。表示物体信息最多的应作为主视图。

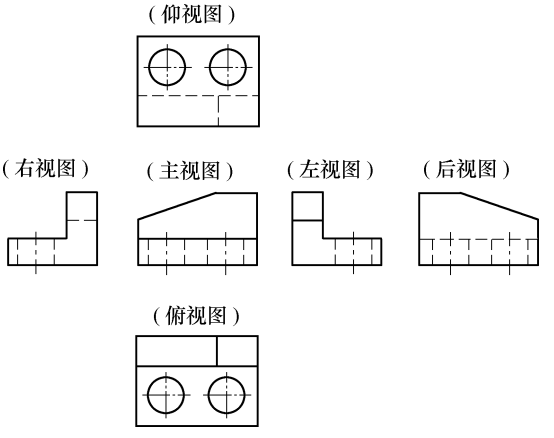


图 2-7-7　六个基本视图的配置

（2）向视图　向视图是可以自由配置的视图。由于图纸幅面及图面布局等原因，允许将视图配置在适当位置，这时应该作如下标注：在向视图上方中间位置处标注视图名称“×”（“×”为大写拉丁字母，并按 *A*、*B*、*C*…顺次使用），在相应的视图附近用箭头指明投影方向，并注上同样的字母，如图 2-7-8 所示。

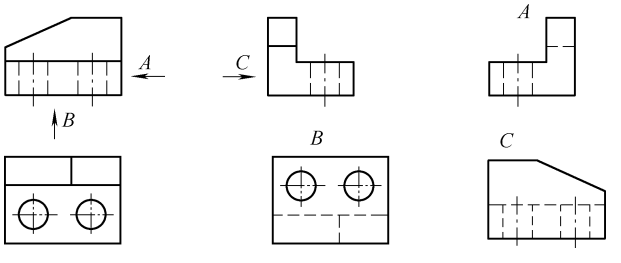


图 2-7-8　向视图

（3）局部视图　局部视图是将物体的某一部分向基本投影面投射所得的视图，是不完整的基本视图。当采用一定数量的基本视图后，该物体仍有部分结构形状未表达清楚，且又没有必要再画出其他完整的基本视图时，可单独将这一部分的结构形状向基本投影面投射。一般用波浪线或双折线表示断裂部分的边界。当所表达的局部结构具有完整封闭的轮廓特征时，波浪线可以省略不画。

局部视图在绘制时，可以按基本视图的形式配置；也可按向视图的形式配置并标注，如图 2-7-9 所示。

（4）斜视图　斜视图是物体向不平行于基本投影面的平面投射所得的视图。斜视图通常按向视图的配置形式配置并进行标注，如图 2-7-10a 所示。必要时，允许将斜视图旋转配置，并标注旋转符号，如图 2-7-10b 所示。

注：旋转符号的箭头指向应与旋转方向一致。表示斜视图名称的大写拉丁字母应靠近旋转符号，当需给出旋转角度时，角度应注写在字母之后。

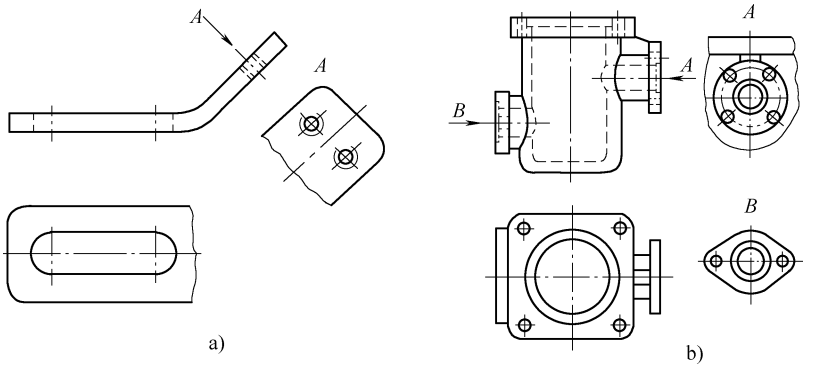


图 2-7-9　局部视图

a）按基本视图配置的局部视图　b）按向视图配置的局部视图

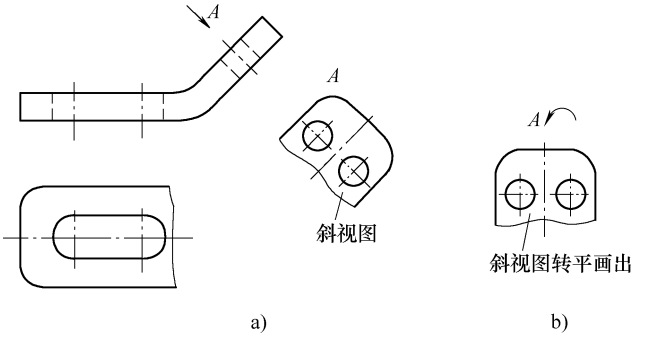


图 2-7-10　斜视图

a）斜视图　b）斜视图转平画出

3. 剖视图（GB/T 17452—1998《技术制图　图样画法　剖视图和断面图》、GB/T 4458.6—2002《机械制图　图样画法　剖视图和断面图》）

（1）剖视图的概念　为了减少视图中的虚线，使图面清晰，可以采用剖视的方法来表达机件的内部结构和形状。

1）剖视图的形成。假想用剖切面剖开物体，将处在观察者和剖切面之间的部分移去，而将其余部分向投影面投射所得的图形称为剖视图，如图 2-7-11 所示。

2）剖切面及剖切方法。剖切面分为以下三种：

① 单一剖切面（旧称单一剖）。该剖切方法是指用一个剖切面（平面或柱面）剖开机件，一般用平行（或垂直）于基本投影面的单一剖切平面剖切。前面介绍的全剖视图、半剖视图和局部剖视图都是用平行于基本投影面的单一剖切平面剖切得到的剖视图。可见用单一剖切平面剖切的方法应用之多，也可用柱面剖切机件，并将其剖视图展开绘制。单一剖切面如图 2-7-12 所示。

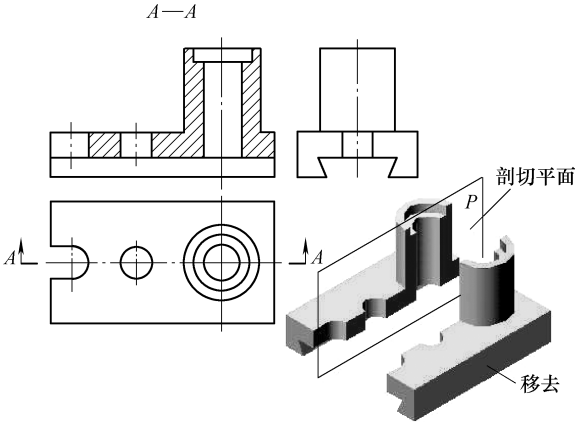


图 2-7-11　剖视图

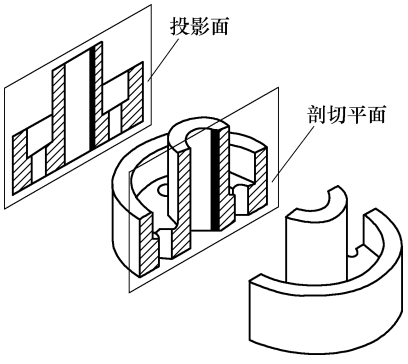


图 2-7-12　单一剖切面

② 几个相交的剖切面（旧称旋转剖）。该剖切方法是指用几个相交剖切平面（其交线应垂直于某一基本投影面）剖开机件。采用这种方法画剖视图时，先假想按剖切位置剖开机件，然后将被剖切平面剖开的倾斜部分结构及其有关部分，绕回转中心（旋转轴）旋转到与选定的基本投影面平行后再投射，如图 2-7-13 所示。

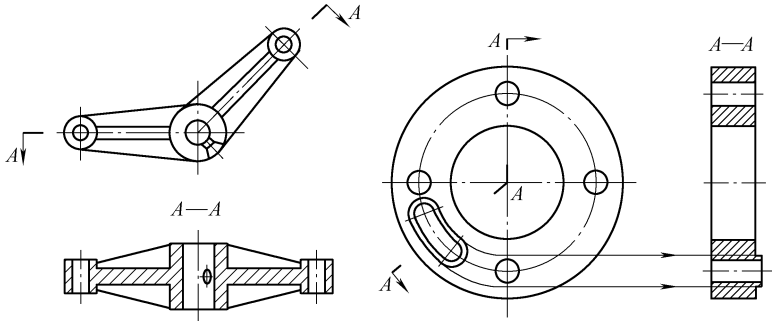


图 2-7-13　几个相交的剖切面（旋转剖）

③ 几个平行的剖切面（旧称阶梯剖）。当机件的内部结构较多，又不处于同一平面内，并且被表达结构无明显的回转中心时，可用几个相互平行的剖切平面剖开机件。采用这种方法画剖视图时，假想由几个平行剖切平面剖切机件所得到的剖视图是在同一平面上，因此不画出剖切平面转折处的分界面的投影，如图 2-7-14 所示。

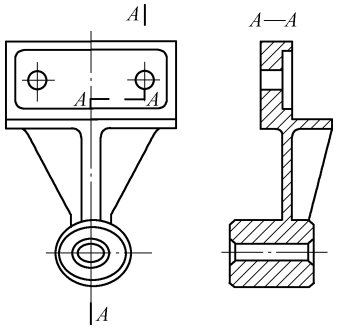


图 2-7-14　几个平行的剖切面（阶梯剖）

3）剖面符号。国家标准规定，剖切面与机件接触部分，即断面上应画上剖面符

号，机件材料不同，其剖面符号画法也不同，见表 2-7-2，其中金属材料的剖面符号为与水平成 45°的等距平行细实线，同一零件的所有剖面图形上，剖面线方向及间隔要一致。

表 2-7-2　剖面符号

金属材料（已有规定剖面符号者除外）			木质胶合板（不分层数）		
线圈绕组元件			基础周围的泥土		
转子、电枢、变压器和电抗器等的迭钢片			混凝土		
非金属材料（已有规定剖面符号者除外）			钢筋混凝土		
型砂、填砂、粉末冶金、砂轮、陶瓷刀片、硬质合金刀片等			砖		
玻璃及供观察用的其他透明材料			格网（筛网、过滤网等）		
木材	纵剖面		液体		
	横剖面				

注：1. 剖面符号仅表示材料的类别，材料的名称和代号必须另行注明。

2. 迭钢片的剖面线方向，应与束装中迭钢片的方向一致。

3. 液面用细实线绘制。

（2）剖视图种类　剖视图分全剖视图、半剖视图、局部剖视图三种。

1）全剖视图。用剖切面完全地剖开物体所得到的剖视图，称为全剖视图，如图 2-7-15所示。

2）半剖视图。当物体具有对称平面时，在垂直于对称平面的投影面上的投影所得到的图形以对称中心线为界，一半画成剖视，另一半画成视图，这样组成一个内外兼顾的图形，称为半剖视图，如图 2-7-16 所示。

3）局部剖视图。用剖切面局部地剖开物体所得到的剖视图称为局部剖视图，如图 2-7-17所示。

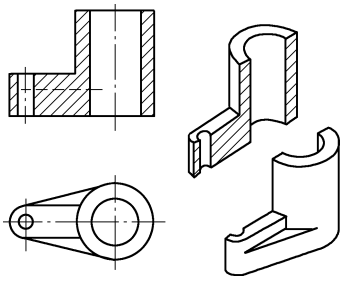


图 2-7-15　全剖视图

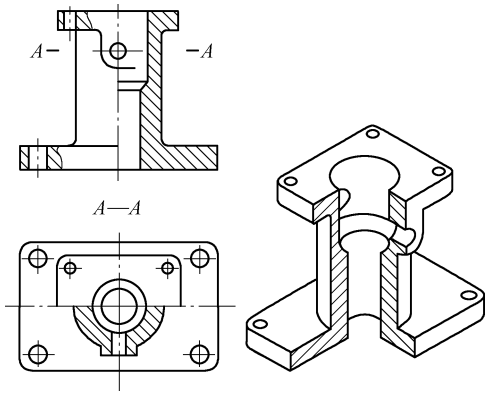


图 2-7-16　半剖视图

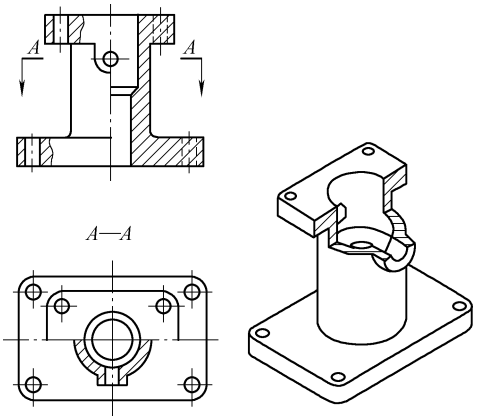


图 2-7-17　局部剖视图

4. 断面图

（1）断面图的概念　假想用剖切面将机件的某处切断，仅画出断面的图形，并画上剖面符号，这种图形称为断面图，简称断面，如图 2-7-18 所示。

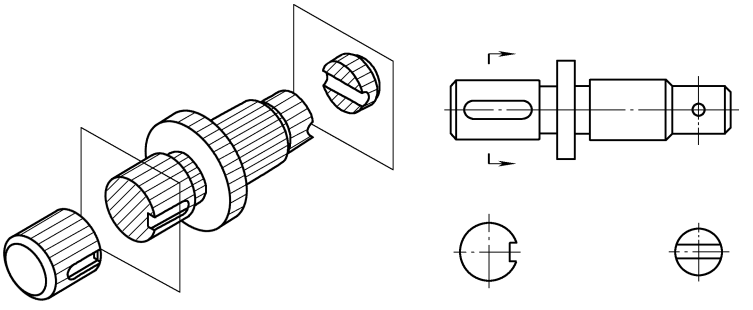


图 2-7-18　断面图

（2）断面图的种类　断面图可分为移出断面和重合断面两种。

1）移出断面。断面图配置在视图轮廓线之外的断面图称为移出断面图。

① 移出断面应尽量配置在剖切线的延长线上，如图 2-7-19 所示。

② 断面图形对称时可画在视图的中断处，如图 2-7-20 所示。

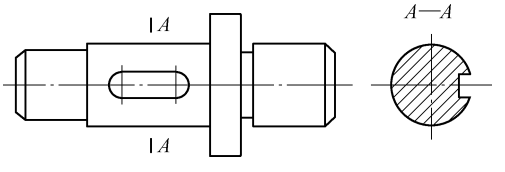


图 2-7-19　移出断面 1

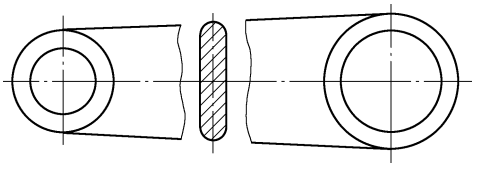


图 2-7-20　移出断面 2

③ 必要时可将移出断面配置在其他适当的位置。在不致引起误解时，允许将图形旋转，但必须标注旋转符号，如图 2-7-21 所示。

④ 当剖切面通过回转面形成的孔或凹坑的轴线时，这些结构应按剖视绘制，如图 2-7-22所示。

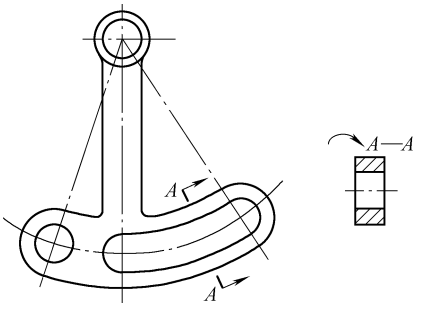


图 2-7-21　移出断面 3

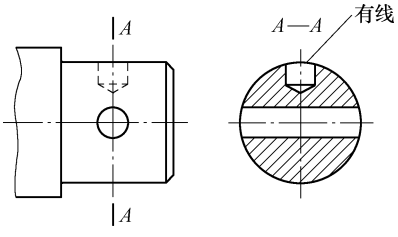


图 2-7-22　移出断面 4

⑤ 若由两个或多个相交的剖切面剖切得到的移出断面，中间一般应断开，如图 2-7-23所示。

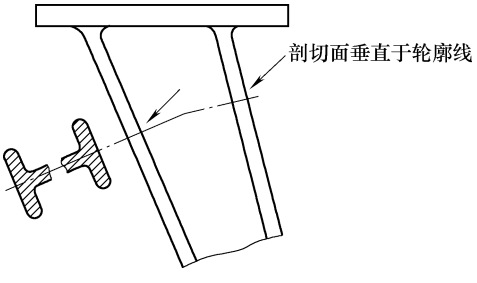


图 2-7-23　移出断面 5

2）重合断面。重合断面图画在视图轮廓线之内，轮廓线用细实线绘制。当视图中的轮廓线与重合断面图的图线重合时，视图中的轮廓线应连续画出，不可间断，如图 2-7-24所示。

5. 局部放大图

当机件上有某些局部细小的结构在已有的视图中还不能表达清楚或不便于标注尺寸等情况出现时，将物体的该部分结构用大于原图形所采用的比例画出的图形，称为局部放大图。

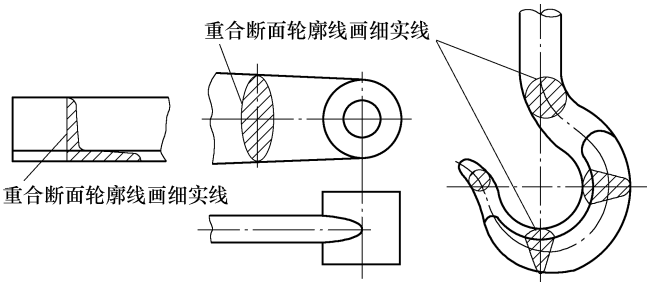


图 2-7-24　重合断面

绘制局部放大图时，一般用细实线圈出需要被放大的部位，在放大图的上方注明所用的比例，即图形大小与原图形大小之比（与原图上的比例无关）；如果放大图不止一个，需要用罗马数字编号予以区别，并在放大图的上方标注出相应的罗马数字及所采用的比例，如图 2-7-25 所示。

局部放大图可画成视图、剖视图、断面图，它与被放大部位的表达方法无关。同一机件上不同部位的局部放大图，当图形相同或对称时，只需画出一个，必要时可用几个图形来表达同一个被放大部位的结构，如图 2-7-25 所示。局部放大图应尽量配置在被放大部位的附近。

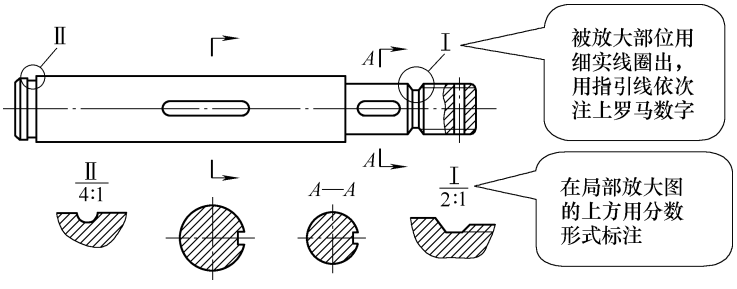
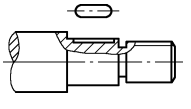
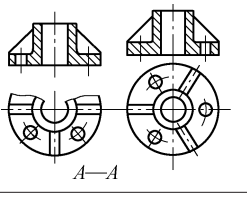
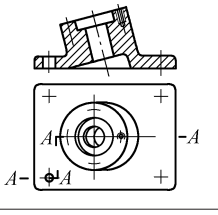
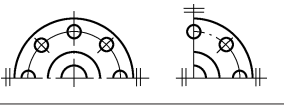


图 2-7-25　局部放大图

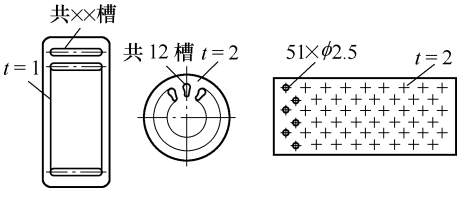
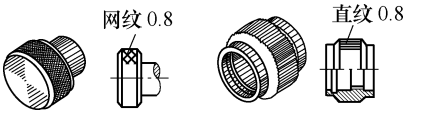
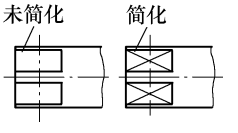
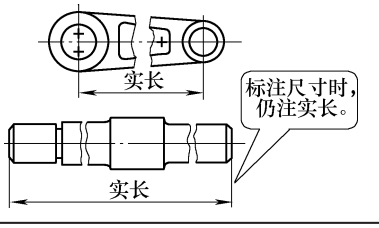
6. 常用简化画法（GB/T 16675. 1—2012《技术制图　简化表示法　第 1 部分：图样画法》）

在实际绘图中，常常遇到若干相同结构或某种固定结构（如肋），此时一般采用简化的绘制方法，见表 2-7-3。

表 2-7-3　常用的简化画法

序　号	图　　例	说　　明
1		不致引起误解时，允许移出断面图上省略剖面符号
2		对于零件的肋、轮辐及薄壁等，如按纵向剖切，这些结构都不画剖面符号。当零件回转体上均匀分布的肋、轮辐、孔等结构不处于剖切平面上时，可将这些结构旋转到剖切平面上画出
3		与投影面倾角小于或等于 30° 的圆或圆弧，手工绘图时，其投影可用圆或圆弧代替
4		在不致引起误解时，对称零件的视图可只画一半或 1/4，并在对称中心线的两端画出两条与其垂直的平行细实线

（续）

序　号	图　　例	说　　明
5		直径相同且成规律分布的孔（圆孔、螺孔、沉孔等）、齿等，可只画一个或几个，其余的用细实线连接或细点画线表示出中心位置
6		网状物、编织物及机件上的滚花部分，可以用粗实线完全或部分地表示出来
7		当回转体上的平面在图形中不能充分表达时，可用两条相交的细实线表示
8		对于较长的机件沿长度方向的形状一致或按一定规律变化时，如轴、杆、连杆等，可以断开后缩短表示，但要标注实际尺寸

7. 轴测图

用平行投影法将物体连同确定该物体的直角坐标系一起沿不平行于任一坐标平面的方向投射到一个投影面上，所得到的图形，称作轴测图，如图 2-7-26所示。

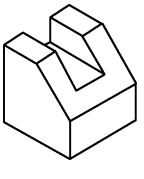


图 2-7-26　轴测图

轴测图是一种常见的立体图，是用二维平面来表达三维空间实体（长、宽、高）的一种方法。轴测图是用轴测投影的方法画出来的图形。轴测投影属于单面平行投影，它能同时反映立体的正面、侧面和水平面的形状，接近人们的视觉习惯，因而立体感较强，对看图和绘图有很大的帮助，但是轴测图不能确切地反映物体真实的形状和大小，并且作图较正投影复杂，因此在工程设计和工业生产中常用作辅助图样，用来帮助人们读懂正投影视图。

三、常用机械零件标识

在各种机械中广泛使用螺钉、螺栓、螺母、垫圈、键、销、滚动轴承等零件。为了便于组织专业化生产，对这些零件的结构、尺寸实行了标准化，故称它们为标准件。

而另外一些虽经常使用，但只是结构定型、部分参数标准化的零件（如齿轮、弹簧），称为常用件。

1. 螺纹

（1）螺纹的标注格式

1）普通螺纹的标注格式。普通螺纹的标记分三段：

螺纹代号-螺纹公差代号-旋合长度代号。

具体内容为：

牙型符号　公称直径×螺距　旋向-中径公差带代号　顶径公差带代号-旋合长度代号。

普通螺纹特征代号用 M 表示，公称直径为螺纹大径。细牙普通螺纹应标注螺距，粗牙普通螺纹不标注螺距。左旋螺纹用“LH”表示，右旋螺纹不标注旋向。螺纹公差代号由表示其大小的公差等级数字和表示其位置的基本偏差的字母（内螺纹为大写，外螺纹为小写）组成，如6H、6g。如两组公差带不相同，则分别注出代号；如两组公差带相同，则只注一个代号。旋合长度为短（S）、中（N）、长（L）三种，一般多采用中等旋合长度，其代号 N 可省略不注，如采用短旋合长度或长旋合长度，则应标注 S 或 L。

例 1：粗牙普通外螺纹，大径为 10mm，右旋，中径公差带为 5g，顶径公差带为 6g，短旋合长度。应标记为：M10-5g6g-S。

2）管螺纹的标注格式。

① 55°密封管螺纹：螺纹特征代号-尺寸代号-旋向代号（也适用于非螺纹密封的内管螺纹）。

② 55°非密封管螺纹：螺纹特征代号-尺寸代号-公差等级代号-旋向代号（仅适用于非螺纹密封的外管螺纹）。

以上螺纹特征代号分两类：①55°密封管螺纹特征代号：R_p 表示圆柱内螺纹，R_1 表示与圆柱内螺纹相配合的圆锥外螺纹，R_c 圆锥内螺纹，R_2 表示与圆锥内螺纹相配合的圆锥外螺纹。②55°非密封管螺纹特征代号为 G。

公差等级分为 A、B 两级，只对 55°非密封的外管螺纹，对内螺纹不标记公差等级代号。螺纹为右选时，不标注旋向代号；为左旋时标注“LH”。

例 2：55°螺纹密封的圆柱内螺纹，尺寸代号为 1，左旋。应标记为：R_p1LH。

例 3：55°非螺纹密封的外管螺纹，尺寸代号为 3/4，公差等级为 A 级，右旋。应标记为：G3/4A。

3）梯形螺纹的标注格式。

① 单线梯形螺纹：

牙型符号　公称直径×螺距　旋向代号-中径公差带代号-旋合长度代号

② 多线梯形螺纹：

牙型符号　公称直径×导程（螺距代号 P 和数值）旋向代号-中径公差带代号-旋合长度代号

梯形螺纹特征代号为“Tr”。右旋不标注，左旋螺纹的旋向代号为“LH”，需标注。梯形螺纹的公差带为中径公差带。梯形螺纹的旋合长度为中（N）和长（L）两组，

采用中等旋合长度（N）时，不标注代号（N），如采用长旋合长度，则应标注“L”。

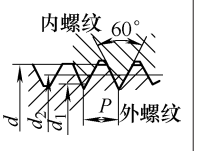
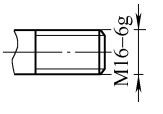
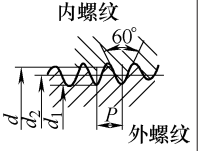
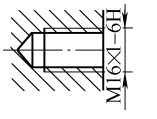
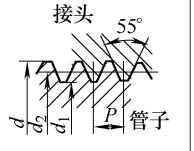
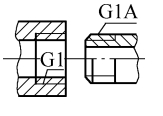
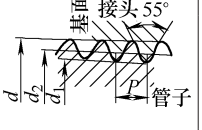
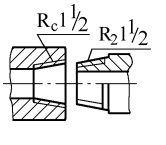
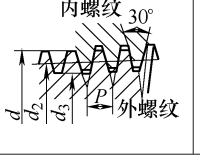
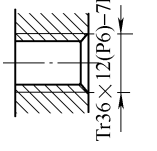
例 4：梯形螺纹，公称直径 40mm，螺距为 7mm，右旋单线外螺纹，中径公差带代号为 7e，中等旋合长度。应标记为：Tr40×7-7e。

例 5：梯形螺纹，公称直径 40mm，导程为 14mm，螺距为 7mm 的左旋双线内螺纹，中径公差带代号为 8H，长旋合长度。应标记为：Tr40×14（P7）LH-8H-L。

锯齿形螺纹标注的具体格式与梯形螺纹完全相同。需要特别注意的是，管螺纹的尺寸不能像一般线性尺寸那样注在大径尺寸线上，而应用指引线自大径圆柱（或圆锥）素线上引出标注。

（2）常用标准螺纹的种类、牙型与标注（表 2-7-4）

表 2-7-4　常用标准螺纹的种类、牙型与标注

螺纹类型			特征代号	牙型略图	标注示例	说明
连接紧固用螺纹	粗牙普通螺纹		M			粗牙普通螺纹，公称直径 16mm，右旋。中径公差带和大径公差带均为 6g。中等旋合长度
	细牙普通螺纹					细牙普通螺纹，公称直径 16mm，螺距 1mm，右旋。中径公差带和小径公差带均为 6H。中等旋合长度
管螺纹	55°非密封管螺纹		G			55°非密封管螺纹 G—螺纹特征代号 1—尺寸代号 A—外螺纹公差带代号
	55°密封管螺纹	圆锥内螺纹	R_c			55°密封管螺纹 R_1—与圆柱内螺纹配合的圆锥外螺纹 R_2—与圆锥内螺纹配合的圆锥外螺纹 $1\frac{1}{2}$—尺寸代号
		圆柱内螺纹	R_p			
		圆锥外螺纹	R_1、R_2			
传动螺纹	梯形螺纹		Tr			梯形螺纹，公称直径 36mm，双线螺纹，导程 12mm，螺距 6mm，右旋。中径公差带 7H。中等旋合长度

（续）

螺纹类型		特征代号	牙型略图	标注示例	说明
传动螺纹	锯齿形螺纹	B	内螺纹 3° P d d_2 d_1 30° 外螺纹	B70×10(1)LH–7e	锯齿形螺纹，公称直径70mm，单线螺纹，螺距10mm，左旋。中径公差带为7e。中等旋合长度

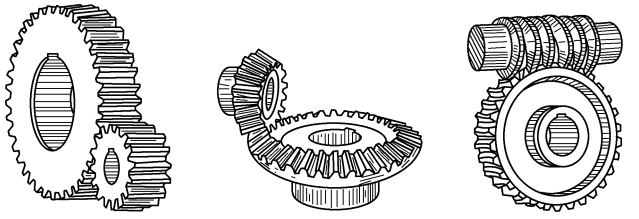
2. 齿轮

齿轮是广泛用于机器或部件中的传动零件，除用来传递动力外，还可以改变转动方向、转动速度等。齿轮的种类很多，常用的齿轮如下：

圆柱齿轮：用于两平行轴之间的转动（图2-7-27a）。

锥齿轮：用于两相交（一般是正交）轴之间的转动（图2-7-27b）。

蜗杆与蜗轮：用于两交叉（一般是垂直交叉）轴之间的转动（图2-7-27c）。



a) b) c)

图2-7-27 常见的齿轮转动

a）圆柱齿轮 b）锥齿轮 c）蜗杆与蜗轮

以下仅介绍标准直齿圆柱齿轮。

直齿圆柱齿轮的结构如图2-7-28所示，由于这种齿轮是由圆柱加工而成，而且轮齿素线是与齿轮线轴线平行的直线，故称为直齿圆柱齿轮。由于齿轮端面轮廓上参与啮合的曲线是一段渐开线，所以又称为渐开线齿轮。

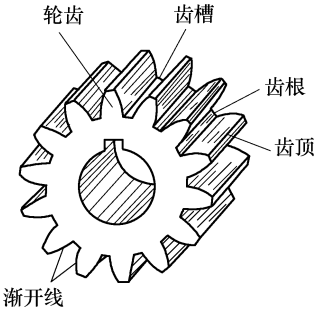


图2-7-28 直齿圆柱齿轮

（1）直齿圆柱齿轮各部分的名称和代号（图2-7-29）

1）齿数 z。齿数指齿轮上轮齿的个数。

2）齿顶圆。齿顶圆指过齿顶的圆柱面与端平面（垂直于齿轮轴线的平面）的交线，其直径用 d_a 表示。

3）齿根圆。齿根圆指过齿根的圆柱面与端平面的交线，其直径用 d_f 表示。

4）节圆和分度圆。节圆是两齿轮啮合接触点所形成的圆，用 d' 表示。对于渐开线齿轮，过齿厚 s 与槽宽 e 相等处的圆柱面称为分度圆柱面。分度圆柱面与端平面的交线称为分度圆，其直径用 d 表示；对于标准齿轮来说，

节圆直径和分度圆直径相等。

5）齿高。齿高指齿顶圆与齿根圆之间的径向距离，用 h 表示。

6）齿顶高。齿顶高指齿顶圆与分度圆之间的径向距离，用 h_a 表示。

7）齿根高。齿根高指齿根圆与分度圆之间的径向距离，用 h_f 表示。

8）齿距。齿距指在齿轮上两个相邻而同侧的端面齿廓之间的分度圆弧长，用 p 表示。

9）齿厚。齿厚指一个齿的两侧齿廓之间的分度圆弧长，用 s 表示。

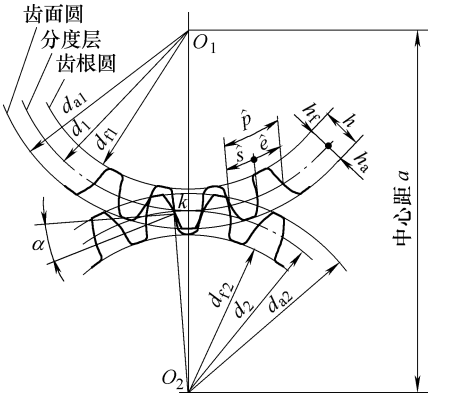


图 2-7-29　直齿圆柱齿轮示意图

10）槽宽。槽宽指一个齿槽的两侧齿廓之间的分度圆弧长，用 e 表示。标准齿轮 $s=e$，$p=s+e$。

11）压力角。2 个相啮合的轮齿在节点 K 处所受压力方向与瞬时运动方向所夹的锐角称为压力角，用 α 表示。我国采用的标准齿轮的压力角一般为 20°。两齿轮相互啮合，压力角和模数必须相等。

12）模数。齿距 p 除以圆周率 π 所得的商，用 m 表示，即 $m=p/\pi$，其单位为 mm。

当齿轮的齿数为 z 时，分度圆的周长为 $\pi d=pz$，则 $d=zp/\pi$，所以 $d=mz$，即分度圆直径等于齿数与模数之积。

模数是齿轮的一个重要参数，模数越大，轮齿就越大，齿轮的承载能力越大。为了便于设计和加工，国家标准中规定了齿轮模数的标准数值，见表 2-7-5。

13）中心距。两圆柱齿轮轴线之间的最短距离称为中心距，用 a 表示。

$$a=(d_1+d_2)/2=m(Z_1+Z_2)/2$$

14）传动比。主动齿轮的转速 n_1 与从动齿轮的转速 n_2 之比称为传动比，用 i 来表示。

$$i=n_1/n_2=Z_2/Z_1;i>1\text{为减速。}$$

表 2-7-5　圆柱齿轮的法向模数（GB/T 1357—2008）

第一系列	1，1.25，1.5，2，2.5，3，4，5，6，8，10，12，16，20，25，32，40，50
第二系列	1.125，1.375，1.75，2.25，2.75，3.5，4.5，5.5，（6.5），7，9，11，14，18，22，28，35，45

（2）直齿圆柱齿轮各部分的尺寸关系

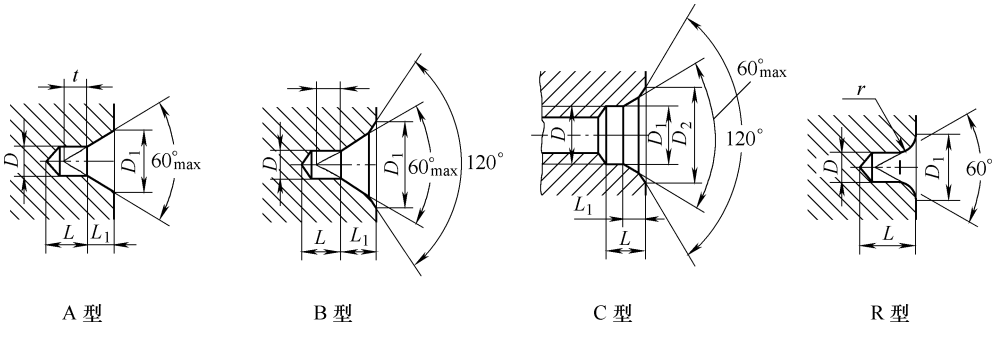
标准直齿圆柱齿轮轮齿部分的各基本尺寸与模数 m 有一定的关系，齿轮的模数 m 确定后，可计算出相关尺寸，见表 2-7-6。

表 2-7-6　直齿圆柱齿轮的计算公式

名　　称	代　　号	计 算 公 式
模数	m	$m=d/z$ 并按表 2-7-5 取标准值
齿顶高	h_a	$h_a=m$
齿根高	h_f	$h_f=1.25m$
齿高	h	$h=h_a+h_f=2.25m$
分度圆直径	d	$d=mz$
齿顶圆直径	d_a	$d_a=d+2h_a=m\ (z+2)$
齿根圆直径	d_f	$d_f=d-2h_f=m\ (z-2.5)$
中心距	a	$a=\ (d_1+d_2)/2=m\ (z_1+z_2)/2$

3. 中心孔

（1）中心孔的结构形式　中心孔是机械零件上常用的一种结构要素，一般分为 A、B、C、R 四种类型，如图 2-7-30 所示。



A 型　　B 型　　C 型　　R 型

图 2-7-30　中心孔的结构形式

A 型：适用于精度要求一般的工件。

B 型：适用于精度要求较高且工序多的工件。

C 型：适用于需要把其他零件轴向固定在轴上。

R 型：适用于轻型和高精度的轴。

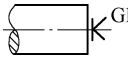
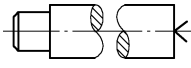
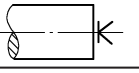
（2）中心孔的简化标注方法（标注中的标准代号可省略）

在图样上标注中心孔的示例见表 2-7-7。

表 2-7-7　中心孔标注示例

要　　求	标 注 示 例	说　　明
在完工零件上保留中心孔	GB/T 4459.5–B4/12.5	中心孔为 B 型，D = 4mm，D_1 = 12.5mm。在完工零件上要求应保留中心孔
在完工零件上可以保留中心孔	GB/T 4459.5–A4/8.5	中心孔为 A 型，D = 4mm，D_1 = 8.5mm。在完工零件上是否保留中心孔都可以

（续）

要　求	标注示例	说　明
在完工零件上不保留中心孔		中心孔为 A 型，D = 1.6mm，D_1 = 3.35mm。在完工零件上不允许保留中心孔
在完工零件上两端保留中心孔		两端的中心孔为 R 型，D = 3.15mm，D_1 =6.7mm。在完工零件上要求两端保留中心孔
省略标准号的中心孔简化表示		中心孔为 A 型，D = 1.6mm，D_1 = 3.5mm。在完工零件上不允许保留中心孔

四、尺寸标注

尺寸标注是一项非常重要的工作，机件的大小是以图样上标注的尺寸数值为制造和检验的依据的。所以，尺寸标注必须严格遵守国家标准（GB/T 4458.4—2003《机械制图　尺寸注法》、GB/T 16675.2—2012《技术制图　简化表示法　第2部分：尺寸注法》）中规定的原则和标注方法。

1. 标注尺寸的基本规则

1）图样上所注的尺寸数值是表示机件的真实大小的数值，与图形的比例和绘图的精度无关。

2）机械图样中的尺寸以毫米（mm）为单位，图中不需要注明该尺寸的单位名称或代号。如采用其他单位时，则必须注明该单位的名称或代号，如角度、弧度等。

3）图样中所标注的尺寸为该机件的最后完工尺寸，否则需另作说明。

4）机件上的每一个尺寸，一般在图样上只标注一次，且应标注在反映该结构最清晰的图形上。

2. 标注尺寸的符号或缩写词

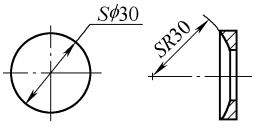
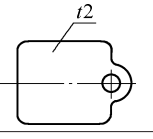
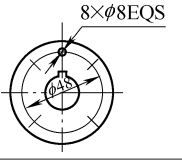
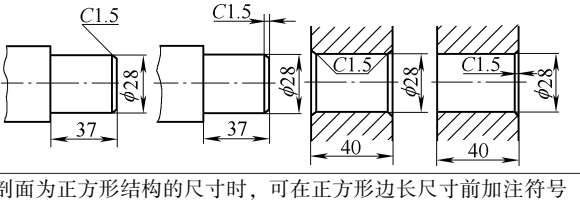
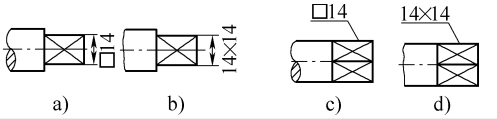
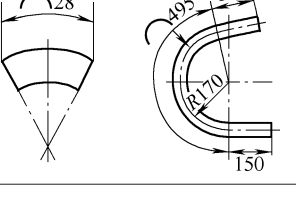
标注尺寸时，应尽可能使用符号和缩写词，见表2-7-8。

表2-7-8　尺寸标注常用的标注尺寸的符号及缩写词

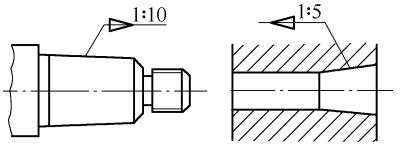
序　号	符号及缩写词			序　号	符号及缩写词		
	含义	现行	曾用		含义	现行	曾用
1	直径	ϕ	（未变）	9	深度	↧	深
2	半径	R	（未变）	10	沉孔或锪平	⌴	沉孔、锪平
3	球直径	$S\phi$	球 ϕ	11	埋头孔	∨	沉孔
4	球半径	SR	球 R	12	弧长	⌒	（仅变注法）
5	厚度	t	厚，δ	13	斜度	∠	（未变）
6	均布	EQS	均布	14	锥度	◁	（仅变注法）
7	45°倒角	C	1×45°	15	展开长	⌒	（新增）
8	正方形	□	（未变）	16	型材截面形状	GB/T 4656.1—2008	GB/T 4656—2000

标注尺寸常用的符号或缩写词的规定见表2-7-9。

表2-7-9　标注尺寸的符号或缩写词的规定

符号或缩写词	含　义	应用规定
ϕ	直径	在直径数字前加注符号“ϕ”，如ϕ30
R	半径	在半径数字前加注符号“R”，如R5
$S\phi$	球直径	在标注球面直径或半径时，在符号“ϕ”或“R”前加注符号“S”，如下图所示 
SR	球半径	在不致引起误解时，允许省略符号“S”
t	厚度	对于板状零件的厚度，可在数字前加符号“t”，如下图所示 
EQS	均布	在同一图形中，对于尺寸相同的成组孔、槽等要素，可只在一个要素上标注其尺寸和数量，并在其后标注出“均布”的英文缩写“EQS”。如下图所示 
C	45°倒角	45°倒角应在倒角高度尺寸数字前加注符号“C”，如下图所示 
□	正方形	标注剖面为正方形结构的尺寸时，可在正方形边长尺寸前加注符号“□”，如下图所示 
⌒	弧长	标注圆弧的弧长尺寸时，应在尺寸数字的左方加注符号“⌒”，如下图所示 

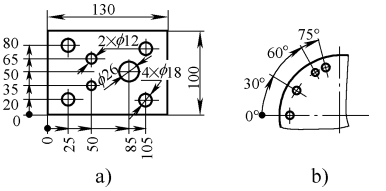
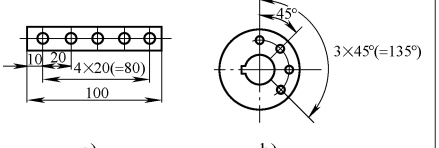
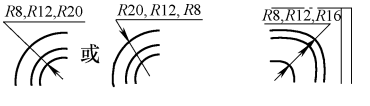
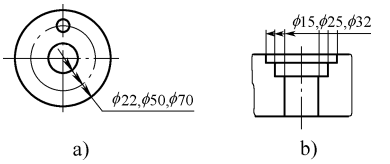
（续）

符号或缩写词	含　义	应 用 规 定
∠	斜度	标注斜度的尺寸比例时，应在比例数字前加注符号“∠”或“⟋”，符号的倾斜方向必须与图形中的倾斜方向相一致，如下图所示
◁	锥度	锥度符号的方向也应与图形中的大、小端方向相一致。锥度注法中的基准线应从符号中穿过，如下图所示 

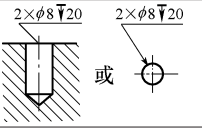
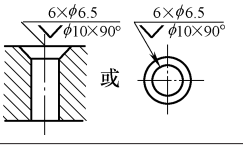
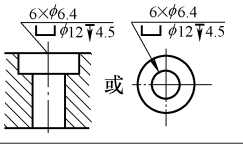
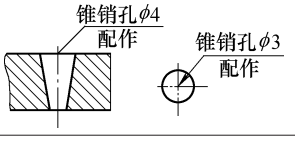
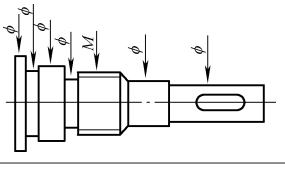
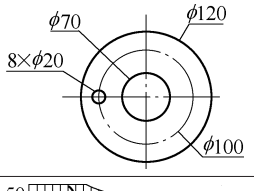
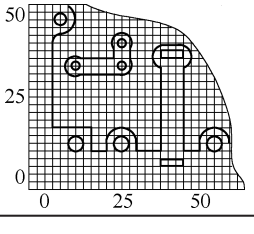
3. 尺寸的简化注法

常见的尺寸简化注法见表 2-7-10。

表 2-7-10　常见的尺寸简化注法

方　法	图　例	说　明
同一基准出发的尺寸标注方法	 a)　b)	适用于从同一基准出发的尺寸及角度的标注
链式尺寸的简化注法	 a)　b)	适用于间隔相等的链式尺寸，但在总尺寸处必须加圆括弧，看作参考尺寸
一组圆弧半径的简化注法	 a) 同心　b) 不同心	一组同心圆弧或圆心位于一条直线上的多个不同心的半径尺寸，可采用共同的尺寸线，依次标出不同的半径数值
同心圆或同轴台阶孔的注法	 a)　b)	一组同心圆或较多的台阶孔的直径尺寸，可采用共同的尺寸线，按顺序依次标注出不同的直径尺寸

（续）

方　法	图　例	说　明
各种孔的简化画法		标注的内容是“2 孔，φ8，孔深 20”。“↧”为深度符号
		标注的内容是“6 孔，φ6.5，其上有 90° 埋头孔，大端为 φ10”。“⌵”为埋头孔符号
		标注的内容是“6 孔，φ6.4，沉孔 φ12 深 4.5”。“⌴”为沉孔或锪平的符号
圆锥销孔的标注方法		圆锥销孔采用旁注法，所注直径尺寸是指配用的圆锥销的公称直径
台阶轴直径的简化注法		标注的台阶轴的尺寸可直接用单端有箭头的尺寸线标注
采用指引线标注尺寸		标注圆的直径尺寸时，也可采用不带箭头的指引线进行标注
采用坐标格子表示尺寸		特别适用于印制板类的零件

4. 零件图的尺寸标注基准

（1）设计基准与工艺基准　零件的尺寸基准是指导零件装配到机器上或在加工、装夹、测量和检验时，用以确定其位置的一些面、线或点。

因此，根据基准的作用，一般将基准分为设计基准和工艺基准，如图 2-7-31a 所示。

1）设计基准。为保证零件的工作性能，在设计时用以确定零件在机器中的位置及

其几何关系的一些面、线、点，称为设计基准。

2）工艺基准。为保证零件的工艺性，在加工过程中根据零件装夹定位、测量、检验等工艺要求而选定的一些面、线、点，称为工艺基准，如图 2-7-31b 所示。

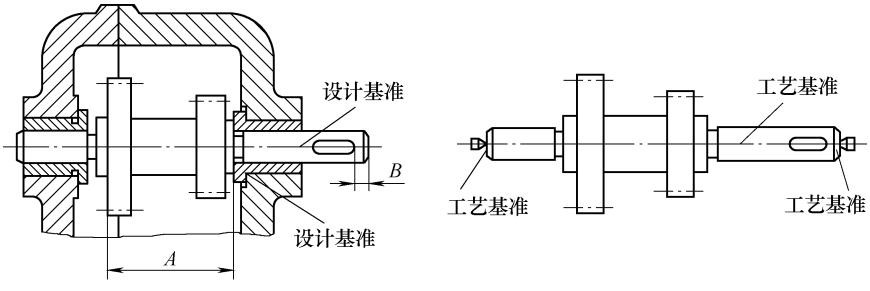


图 2-7-31　设计基准与工艺基准

（2）基准的选择　任何一个零件都有长、宽、高三个方向（或轴向、径向两方向）的尺寸，每个尺寸都有基准，因此每个方向至少要有一个基准。同一方向上有多个基准时，其中必定有一个基准是主要的，称为主要基准；其余的基准则为辅助基准。主要基准与辅助基准之间应有尺寸联系。

主要基准应为设计基准，同时也为工艺基准；辅助基准可为设计基准或工艺基准。从设计基准出发标注尺寸，能反映设计要求，保证零件在机器中的工作性能；从工艺基准出发标注尺寸，能把尺寸标注与零件加工制造联系起来，保证工艺要求，方便加工和测量。因此，标注尺寸时应尽可能将设计基准与工艺基准统一起来，如上例齿轮轴的轴线既是径向设计基准，也是径向工艺基准，即工艺基准与设计基准是重合的，称之为“基准统一原则”。这样既能满足设计要求，又能满足工艺要求。一般情况下，工艺基准与设计基准是可以做到统一的，当两者不能统一时，要优先选择设计基准作为尺寸基准，即在满足设计要求的前提下，力求满足工艺要求，以设计基准为主要基准，工艺基准为辅助基准。

常用的基准如下：

基准面：零件的安装底面、重要端面、对称面、主要加工面、装配结合面、轴肩平面等。

基准线：回转体轴线、主要孔的轴线、坐标轴线、对称中心线。

基准点：圆心、球心等。

应根据零件的设计要求和工艺要求，结合零件实际情况恰当选择尺寸基准。

第二节　尺寸公差与配合简介

要实现零件的互换性，除统一其结构和尺寸外，还应统一规定公差与配合，这是保证互换性的基本措施之一，而公差与配合标准是基本的互换性标准。

一、公差与配合的基本术语和定义（GB/T 1800.1—2009《产品几何技术规范（GPS）极限与配合　第1部分：公差、偏差和配合的基础》）

由于零件在实际生产过程中受到加工、测量等诸多因素的影响，加工完一批零件的实际尺寸总存在一定的误差，为保证零件的互换性，必须将零件尺寸控制在允许的变动范围内，这个允许的尺寸变动量称为尺寸公差，简称公差。

1. 与尺寸有关的术语和定义

（1）公称尺寸　由图样规范确定的理想形状要素的尺寸。设计时可根据零件的使用要求，通过计算、试验或类比的方法，并经过标准化后确定公称尺寸。设计时应尽量采用标准尺寸，以减少加工所用刀具、量具的规格。公称尺寸的代号：孔用 D，轴用 d 表示。

（2）实际尺寸　通过实际测量所得的尺寸。由于存在测量误差，所以实际尺寸并非尺寸的真值。同时由于形状误差等影响，零件同一表面不同部位的实际尺寸往往是不等的。实际尺寸的代号：孔用 D_a，轴用 d_a 表示。

（3）极限尺寸　尺寸要素允许的尺寸的两个极端。两个极限尺寸中允许的最大尺寸称上极限尺寸，孔用 D_{max}，轴用 d_{max} 表示。允许的最小尺寸称下极限尺寸，孔用 D_{min}，轴用 d_{min} 表示。

极限尺寸是设计时给定的，它以公称尺寸为基数，用于控制零件实际尺寸。合格零件的实际尺寸应在两极限尺寸之间。

2. 与公差、偏差有关的术语和定义

（1）尺寸偏差　某一尺寸减其公称尺寸所得的代数差，称为尺寸偏差，简称偏差。

实际尺寸减其公称尺寸所得的代数差，称为实际偏差。

极限尺寸减其公称尺寸所得的代数差，称为极限偏差。极限偏差分为上极限偏差和下极限偏差。

上极限偏差：上极限尺寸减其公称尺寸所得的代数差。

孔的上极限偏差代号 ES，$ES = D_{max} - D$

轴的上极限偏差代号 es，$es = d_{max} - d$

下极限偏差：下极限尺寸减其公称尺寸所得的代数差。

孔的下极限偏差代号 EI，$EI = D_{min} - D$

轴的下极限偏差代号 ei，$ei = d_{min} - d$

偏差可以为正、负或零值。当极限尺寸大于、小于或等于公称尺寸时，其极限偏差便分别为正、负或零值。为方便起见，通常在图样上标注极限偏差而不标极限尺寸。

（2）尺寸公差　尺寸公差是指上极限尺寸减下极限尺寸之差，或上极限偏差减下极限偏差之差，它是允许尺寸的变动量，简称公差。

孔公差：$T_h = D_{max} - D_{min} = ES - EI$

轴公差：$T_s = d_{max} - d_{min} = es - ei$

由上述可知，公差总为正值。

关于尺寸、公差与偏差的概念可用图 2-7-32 所示的极限与配合示意图直观看出。

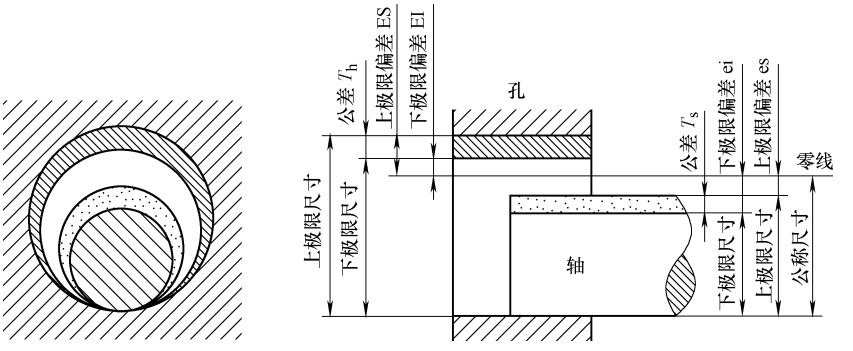


图 2-7-32　极限与配合示意图

（3）零线、公差带和公差带图　在分析公差与配合时，需要作图。但因公差数值与尺寸数值相差甚远，不便用同一比例。因此，在作图时，只画出放大的孔和轴的公差图形，这种图形称为公差带图，如图 2-7-33 所示。如图 2-7-32 所示的极限与配合示意图可作成如图 2-7-33 所示的公差带图。在作图时，先画一条横坐标代表公称尺寸的界线，作为确定偏差和公差的基准线，称为零线。再按给定比例画两条平行于零线的直线，代表上极限偏差和下极限偏差或上极限尺寸和下极限尺寸。这两条直线所限定的区域称为公差带，线间距即为公差。

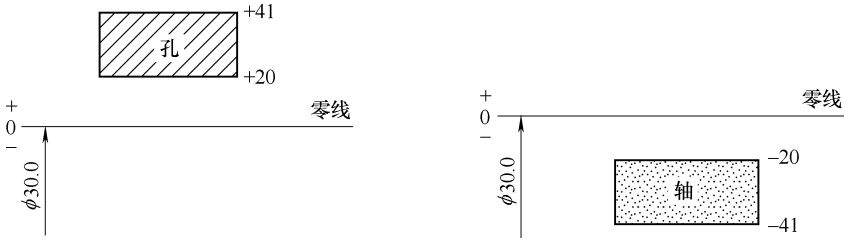


图 2-7-33　公差带图

正偏差位于零线之上，负偏差位于零线之下。在零线处注出公称尺寸，在公差带的边界线旁注出极限偏差值，单位用 μm 或 mm 皆可。

（4）标准公差和基本偏差　公差带由“公差带大小”和“公差带位置”两个要素组成。标准公差确定公差带的大小，而基本偏差确定公差带的位置。

1）标准公差（IT）。用以确定公差带大小的任一公差，称为标准公差，用 IT 表示。它是依据公称尺寸和公差等级确定的。其中公差等级是确定尺寸精确程度的等级。标准公差分为 20 级，即 IT01、IT0、IT1、…、IT18。其尺寸精确程度从 IT01 到 IT18 依次降低。标准公差的具体数值可查表得到。为了减少公差值的数目，统一公差值，简化表格，便于应用，国家标准对公称尺寸进行了分段。尺寸分段后，对同一尺寸分段

内所有公称尺寸，公差等级相同的情况下，规定相同的标准公差。公差等级相同，公称尺寸相同或在同一尺寸分段内孔公差和轴公差是相等的。

2）基本偏差。基本偏差是指用以确定公差带相对于零线位置的那个极限偏差，一般是指靠近零线的那个偏差。当公差带在零线上方时，基本偏差为下极限偏差；当公差带在零线下方时，基本偏差为上极限偏差。

国家标准 GB/T 1800.1—2009 对孔和轴均规定了 28 个不同的基本偏差。基本偏差代号用拉丁字母表示，大写字母表示孔，小写字母表示轴，如图 2-7-34 所示。基本偏差系列图只表示了公差带的各种位置，所以只画出属于基本偏差的一端，另一端则是开口的，即公差带的另一端取决于标准公差（IT）的大小。

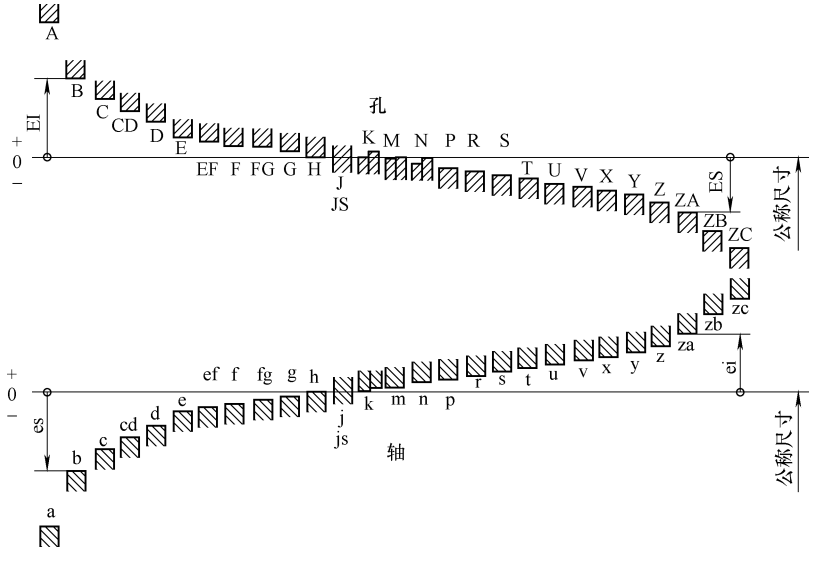


图 2-7-34　基本偏差系列图

3. 与配合有关的术语和定义

孔——通常指工件各种形状的内表面，包括圆柱形内表面和其他由单一尺寸形成的非圆柱形包容面。

轴——通常指工件各种形状的外表面，包括圆柱形外表面和其他由单一尺寸形成的非圆柱形被包容面。

配合是指公称尺寸相同的并且相互结合的孔和轴公差带之间的关系。这种关系决定着配合的松紧程度。而这松紧程度是用间隙和过盈来描述的。配合按其出现间隙或过盈的不同分为间隙配合、过盈配合和过渡配合。

（1）间隙或过盈　在孔与轴的配合中，孔的尺寸减去相配合轴的尺寸所得的代数差称为间隙或过盈。当差值为正时是间隙，用 X 表示，其数值前应标“ + ”号。当差值为负时是过盈，用 Y 表示，其数值前应标“ − ”号。

（2）间隙配合　孔的公差带完全在轴的公差带之上，任取其中一对孔、轴相配，

具有间隙（包括最小间隙等于零）的配合，称为间隙配合，如图 2-7-35a 所示。

（3）过盈配合　孔的公差带完全在轴的公差带之下，其中任取一对孔、轴相配，具有过盈（包括最小过盈等于零）的配合，称为过盈配合，如图 2-7-35b 所示。

（4）过渡配合　孔的公差带与轴的公差带相互交叠，任取其中一对孔、轴相配，可能具有间隙也可能具有过盈的配合，如图 2-7-35c 所示。

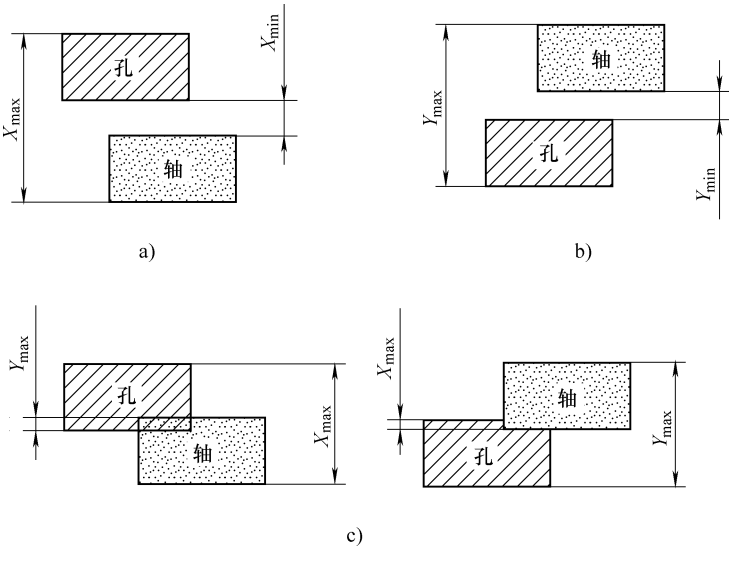


图 2-7-35　配合种类

a）间隙配合　b）过盈配合　c）过渡配合

（5）配合公差　配合公差为组成配合的孔公差与轴公差之和，它是允许间隙或过盈的变动量，以 T_f 表示。其计算公式为：

间隙配合：$T_f = |X_{max} - X_{min}|$

过盈配合：$T_f = |Y_{min} - Y_{max}|$

过渡配合：$T_f = |X_{max} - Y_{max}|$

将最大、最小间隙和最大、最小过盈分别用孔、轴极限尺寸或极限偏差换算后代入上式，可以得出三类配合的共同公式为 $T_f = T_h + T_s$。

这一结论说明配合件的装配精度与零件的加工精度有关，若要提高装配精度，使配合后间隙或过盈的变化范围减小，则应减小零件的公差，即需要提高零件的加工精度。

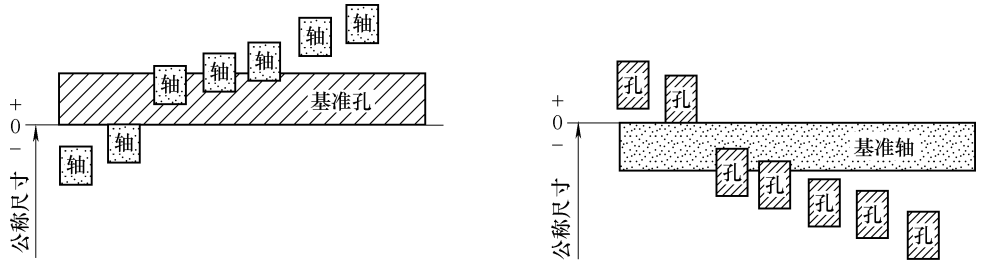
4. 配合制

极限制是指经标准化的公差与偏差制度。配合制是指同一极限制的孔和轴组成的一种配合制度。为了使配合种类进一步简化，便于生产，国家标准规定了两种基准制配合：基孔制配合和基轴制配合。

（1）基孔制配合　基孔制配合是基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差

的轴的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2-7-36a 所示。在基孔制配合中，孔是基准件，称为基准孔。基准孔的基本偏差代号为 H，它的基本偏差为下极限偏差，数值为零，上极限偏差为正值，其公差带位于零线上方并紧邻零线。由基本偏差系列图中可以看出，在基孔制配合中，a ~ h 用于间隙配合，j ~ zc 用于过渡配合和过盈配合。

（2）基轴制配合　基轴制配合是基本偏差为一定的轴的公差带，与不同的基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2-7-36b 所示。在基轴制配合中，轴是基准件，称为基准轴。基准轴的基本偏差代号为 h，它的基本偏差为上极限偏差，数值为零，下极限偏差为负值，其公差带位于零线下方并紧邻零线。由基本偏差系列图中可以看出，在基轴制配合中，A ~ H 用于间隙配合，J ~ ZC 用于过渡配合和过盈配合。



a)　　b)

图 2-7-36　配合制

a）基孔制配合　b）基轴制配合

二、尺寸公差与配合在图样上的标注方法

1. 配合代号

配合代号由两个相互结合的孔和轴的公差带代号组成，写成分数形式，分子为孔的公差带代号，分母为轴的公差带代号。凡是分子中含 H 的为基孔制配合，凡是分母中含 h 的为基轴制配合。

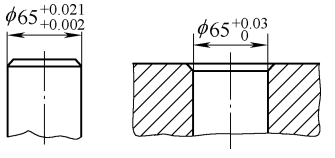
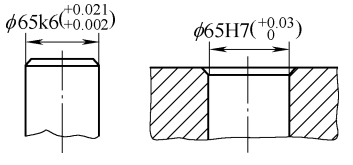
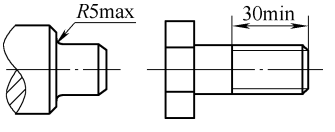
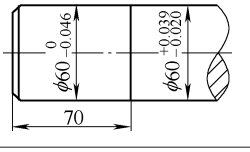
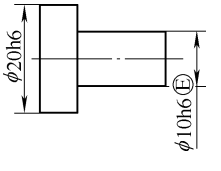
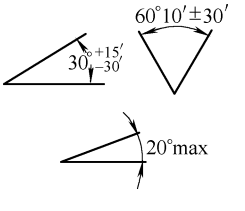
2. 零件图中尺寸公差的标注方法

零件图中尺寸公差的标注方法见表 2-7-11。

表 2-7-11　零件图中尺寸公差的标注方法

类　型	图　例	方　法
线性尺寸公差的标注	ϕ65k6　ϕ65H7	当采用公差带代号标注线性尺寸的公差时，公差带代号应注在公称尺寸右边

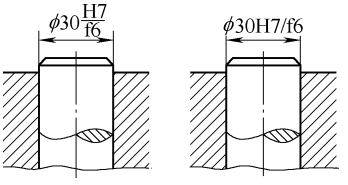
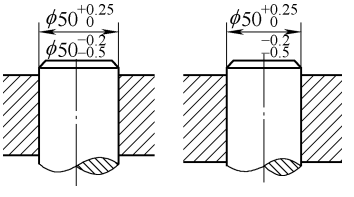
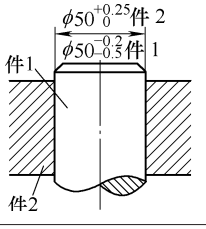
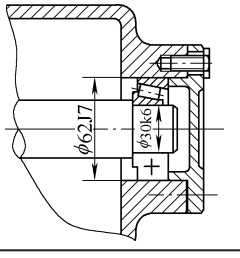
（续）

类　型	图　例	方　法
线性尺寸公差的标注		当采用极限偏差标注线性尺寸的公差时，上极限偏差应注在公称尺寸右上方，下极限偏差应注在公称尺寸右下方。上、下极限偏差的小数点必须对齐，小数点后的位数也必须相同；当上极限偏差或下极限偏差为“零”时用数字“0”标出（不加正、负号），并与上极限偏差或下极限偏差的小数点前的个位数对齐；当公差带相对于公称尺寸对称配置，即两个偏差绝对值相同时，偏差只需注写一次，并应在偏差与公称尺寸之间注出符号“±”，且两者数字高度相同
		当要求同时标注公差带代号和相应的极限偏差时，应在公称尺寸右边注出公差带代号和相应的极限偏差，但极限偏差应加上括号
线性尺寸公差附加符号的标注		当尺寸仅需要限制单方向极限时，应在该极限尺寸右面加注符号“max”或“min”
		同一尺寸表面若具有不同的公差，应用细实线分开，并分别注出公差
		如果要素的尺寸公差和几何公差的关系要遵守包容原则，应在尺寸公差右面加注符号Ⓔ
角度公差的标注		角度公差标注的基本方法和线性尺寸公差的标注方法相同

3. 装配图上配合代号和极限偏差的标注方法

装配图上配合代号和极限偏差的标注方法见表 2-7-12。

表 2-7-12　装配图上配合代号与极限偏差的标注方法

类　型	图　例	方　法
标注配合代号		在装配图中标注线性尺寸的配合代号时，必须在公称尺寸的右边用分数形式注出，分子为孔的公差代号，分母为轴的公差代号（左图）。必要时也可按右图的形式标注 当零件需与外购的非标准件配合时，也应采用这种标注形式
标注极限偏差		在装配图中标注相配零件的极限偏差时，孔的公称尺寸和极限偏差注写在尺寸线的上方，轴的公称尺寸和极限偏差注写在尺寸线的下方，也允许注写在尺寸线中断处，只写一个公称尺寸，将孔轴的极限偏差分别注写在尺寸线的上、下方
特殊的标注形式		当公称尺寸相同的多个轴（孔）与同一孔（轴）相配合而又必须在图外标注其配合时，为了明确各自的配合对象，可在公差带代号或极限偏差之后加注装配件的序号
		标注标准件、外购件与零件（轴或孔）的配合要求时，可以仅标注相配零件的公差代号

第三节　几何公差及表面结构的粗糙度简介

一、几何公差（GB/T 1182—2008《产品几何技术规范（GPS）几何公差　形状、方向、位置和跳动公差标注》）

广义上讲，GPS 标准中的“几何公差”包含尺寸公差、形状与位置公差和表面结构三部分内容。但本节所涉及的 GPS 标准将“几何公差”限定在形状、方向、位置和跳动公差的范围内，即以前的“形状与位置公差”。因此本节的“几何公差”均指“形状与位置公差（简称‘形位公差’）”。

1. 几何公差概述

（1）几何误差　在任何机械产品的加工过程中，由于加工设备、工件、刀具、夹

具及工艺操作等因素的影响，不仅会产生尺寸误差，而且会使被加工零件的各几何要素产生一定的形状误差和位置误差。这些几何要素的误差统称为几何误差。

① 产生形状误差的主要因素有内应力；夹紧力、切削力引起工件和设备的弹性变形；温度影响；刀具磨损；切削过程中的振动；热处理变形等。

② 产生位置误差的主要因素有机床本身的误差；零件的安装误差和定位误差；夹具和刀具的误差；零件和设备的弹性变形。

（2）几何误差对产品质量的影响　零件的各要素或要素之间产生的形状和位置误差，即几何误差，会影响零件的使用功能、可装配性和工作寿命。例如：由于零件的轴线有直线度误差，使轴和孔不能正常配合，轴和孔之间呈点接触，使回转精度降低，轴或孔的磨损加快，零件的寿命降低。由于轴存在着圆度误差，使滑动轴承与轴的油膜层厚度变化，影响承载能力和运动精度。由于密封环平面度误差存在，使接触面不能很好贴合，影响密封性。

因此，为保证机械产品的质量和零件的互换性，必须对几何误差加以控制，并根据使用要求，并考虑工艺性和经济性，规定出合理的几何公差。

（3）要素及其分类（GB/T 18780.1—2002《产品几何量技术规范（GPS）几何要素　第1部分：基本术语和定义》）

1）尺寸要素。由一定大小的线性尺寸或角度尺寸确定的几何形状，如圆柱面、两反向的平行平面、圆锥面等（如平面、直线等均为非尺寸要素。）

2）几何要素。机械零件不论其结构特征如何，都是由若干构成其几何特征的点、线、面组成，这些点、线、面统称为几何要素，如图2-7-37所示。几何公差的研究对象就是构成零件几何特征的要素。

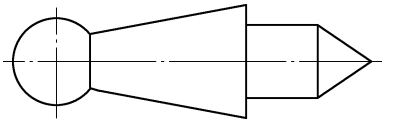


图2-7-37　零件的几何要素

几何要素存在于以下三个范畴中：

设计的范畴：设计范畴指设计者对未来工件的设计意图的一些表述，包括公称组成要素、公称导出要素。

工件的范畴：工件的范畴指物质和实物的范畴，包括实际组成要素、工件实际表面。

检验和评定的范畴：通过用计量器具进行检验来表示，以提取足够多的点来代表实际工件，并通过滤波、拟合、构建等操作后对照规范进行评定，包括提取组成要素、提取导出要素、拟合组成要素和拟合导出要素。

国家标准GB/T 18780.1—2002规定了几何要素定义之间的相互关系，如图2-7-38所示。

几何要素的分类：

① 按结构特征分类。

组成要素：是指构成零件外形轮廓的点、线、面各要素。

特点：具体，看得见。

导出要素：组成要素对称中心所表示的点、线、面各要素。如球心、轴线等。

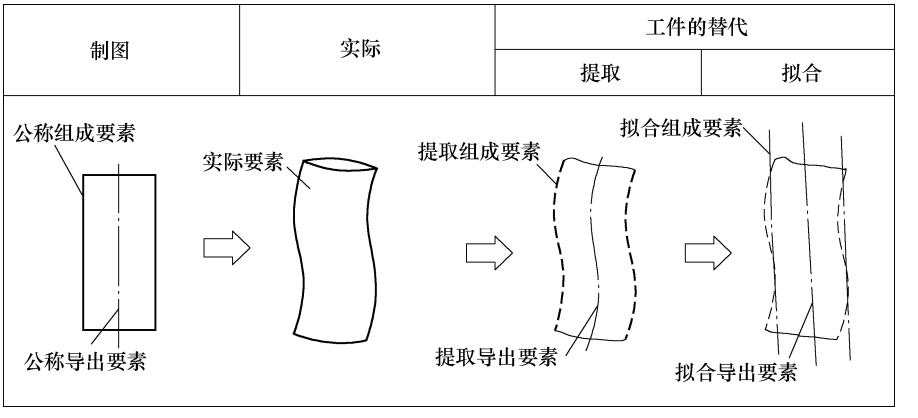


图 2-7-38　几何要素定义之间的相互关系

特点：抽象，看不见。

② 按存在的状态分类。

公称要素：公称要素是指由技术制图或其他方法确定的理论正确组成要素，只是具有几何意义而不存在形位和其他误差的要素。如图样上组成零件图形的点、线、面，它们是没有任何几何误差的理想要素。

实际要素：实际要素是指零件上实际存在的要素。在评定几何误差时，通常以提取要素（测得要素）代替实际要素。

③ 按所处地位分类。

被测要素：被测要素是指在图样上给出了形状或（和）位置公差要求的要素，是测量的对象。

基准要素：基准要素是用来确定被测要素的方向或（和）位置的要素，在图样上应用基准符号标注。以轴线或中心平面作基准要素时，习惯上常把与其相联系的轮廓表面也称为基准要素。

④ 按功能关系分类。

单一要素：单一要素是指仅对要素本身给出形状公差要求的要素，如一个点、一个圆柱面、一个平面和一根轴线等。

关联要素：关联要素指与其他要素具有功能关系的要素。所谓功能关系，是指要素间某种确定的方向和位置关系，如：垂直、平行、同轴和对称等。

（4）几何公差的分类，几何特征及符号　几何公差是几何特征的实际要素对其公称要素的允许变动（偏离）全量。

1）几何公差的分类。几何公差可分为形状公差、方向公差、位置公差和跳动公差。

形状公差是指单一实际要素的形状所允许的变动全量，包括：直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度和面轮廓度。

方向公差是指实际要素对基准在方向上允许的变动全量，包括：平行度、垂直度、倾斜度、线轮廓度和面轮廓度。

位置公差是指关联实际要素的位置对基准允许的变动全量，包括：位置度、同心度、同轴度、对称度、线轮廓度和面轮廓度。

跳动公差是指关联实际要素绕基准轴线回转一周或连续回转时所需的最大跳动量，包括：圆跳动和全跳动。

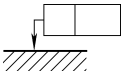
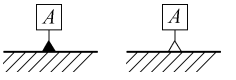
2）几何公差的几何特征及基本符号。GB/T 1182—2008《产品几何技术规范（GPS）几何公差　形状、方向、位置和跳动公差标注》将几何公差分为19种几何特征，其名称及符号见表2-7-13。

表2-7-13　几何特征符号

公差类型	几何特征	符　号	有无基准
形状公差	直线度	—	无
	平面度	▱	无
	圆度	○	无
	圆柱度	⌭	无
	线轮廓度	⌒	无
	面轮廓度	⌓	无
方向公差	平行度	//	有
	垂直度	⊥	有
	倾斜度	∠	有
	线轮廓度	⌒	有
	面轮廓度	⌓	有
位置公差	位置度	⌖	有或无
	同心度（用于中心点）	◎	有
	同轴度（用于轴线）	◎	有
	对称度	⌯	有
	线轮廓度	⌒	有
	面轮廓度	⌓	有
跳动公差	圆跳动	↗	有
	全跳动	⌰	有

3）几何公差的附加符号。几何公差的附加符号见表2-7-14。

表 2-7-14　几何公差的附加符号

说　明	符　号	说　明	符　号
被测要素		全周（轮廓）	
基准要素		包容要素	Ⓔ
		公共公差带	CZ
基准目标	$\phi 2$ / $A1$	小径	LD
理论正确尺寸	50	大径	MD
延伸公差带	Ⓟ	中径、节径	PD
最大实体要求	Ⓜ	线素	LE
最小实体要求	Ⓛ	不凸起	NC
自由状态条件（非刚性零件）	Ⓕ	任意横截面	ACS

注：如需标注可逆要求，可采用符号Ⓡ，见 GB/T 16671。

注意，基准符号由Ⓐ改换为 或 。原标准中形位公差的限定符号（+）、（-）、（▷）、（◁）在新标准中已经取消。旧国家标准中形位公差的限定符号见表 2-7-15。

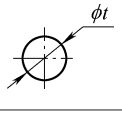
表 2-7-15　旧国家标准中形位公差的限定符号

符　号	对误差限定
（+）	只允许实际要素的中间部位向材料内凹下
（-）	只允许实际要素的中间部位向材料外凸起
（▷）	只允许实际要素从左至右逐渐减小
（◁）	只允许实际要素从右至左逐渐减小

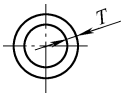
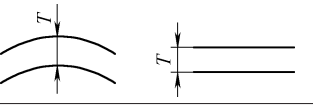
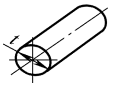
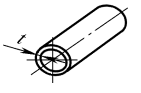
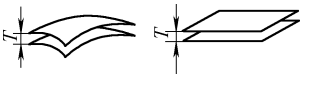
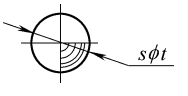
（5）几何公差带　几何公差带是表示实际要素允许变动的区域。几何公差是用几何公差带来表示的，构成几何公差带的四个要素是几何公差带的形状、大小、方向和位置。被测要素必须位于具有确定形状、大小、方向及位置的公差带区域内。

1）公差带的形状。公差带的形状取决于被测要素的形状以及几何公差的标注形式。根据公差的几何特征及其标注方式，公差带的主要形状分为 7 种，见表 2-7-16。

表 2-7-16　几何公差带的形状

公差带名称	公差带形状	特　征
一个圆		一个圆内的区域

（续）

公差带名称	公差带形状	特　　征
两同心圆		两同心圆之间的区域
两等距线或两平行线		两等距线或两平行直线之间的区域
一个圆柱		一个圆柱面内的区域
两同轴圆柱面		两同轴圆柱面之间的区域
两等距面或两平行面		两等距面或两平行平面之间的区域
一个球		一个圆球面内的区域

2）公差带大小。公差带大小用几何公差带的宽度或直径表示，由公差标注中给定的几何公差值决定，它表明了对几何要素几何精度要求的高低。

3）公差带的方向。公差带方向由给定的几何公差项目和标注形式确定。

4）公差带的位置。在位置公差中，公差带与基准的位置，可用尺寸公差或理论正确尺寸定位。

（6）基准（GB/T 17851—2010《产品几何技术规范（GPS）几何公差　基准和基准体系》）

1）基准和基准要素。基准是用来定义公差带的位置和（或）方向，或用来定义实体状态的位置和（或）方向（当有相关要求时，如最大实体要求）的一个（组）方位要素。

基准是确定要素间几何关系的依据，根据其几何特征可分别称为基准点、基准直线（或基准轴线）、基准平面（或基准中心面）。由于它们都是理想的，故基准点仅有位置而无大小，基准直线仅有长度而无宽度，基准平面仅考虑范围而不考虑厚度。

基准要素是指零件上用来建立基准并实际起基准作用的实际（组成）要素，例如零件上的某一边、平面、孔等。

2）基准的类型。基准根据其构成情况，可分成以下类型：

① 单一基准。单一基准是由一个单一要素表示的作为一个基准使用的要素，这

样的要素可以是一个平表面，或不连续的同一个间断平表面，也可以是一个圆柱面的轴线。单个基准时，由实际要素建立基准应符合最小条件。单一基准如图 2-7-39 所示。

② 组合基准（公共基准）。公共基准是由两个或多个同类基准要素构成而作为一个基准使用的一组要素，如图 2-7-40 所示。

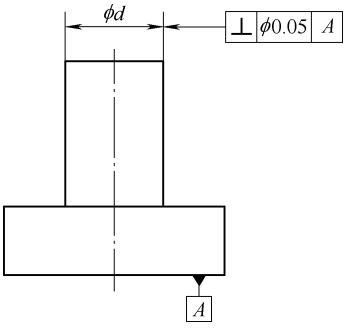


图 2-7-39　单一基准

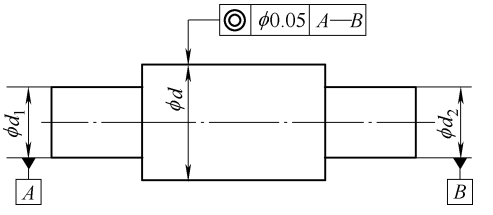


图 2-7-40　组合基准（公共基准）

③ 三基面体系（基准体系）。限制几何要素位置变动的公差带通常为一空间区域。当确定该区域的方向和位置时，单一基准常常是不够的，往往要求两个或三个基准，参与定位的多个基准构成了一个基准体系。为了与空间直角坐标系一致，规定以三个相互垂直的理论平面构成的基准体系称为三基面体系，如图 2-7-41所示。三个相互垂直的平面称为基准平面；每两个基准平面的交线称为基准轴；三轴的交点称为基准点。由于基准体系与空间直角坐标系一致，这就有可能使设计、工艺和检测的基准取得统一。应用三基面体系时，应选最重要的或最大的平面作为第一基准，选次要的或较长的平面作为第二基准，选不重要的平面作为第三基准。

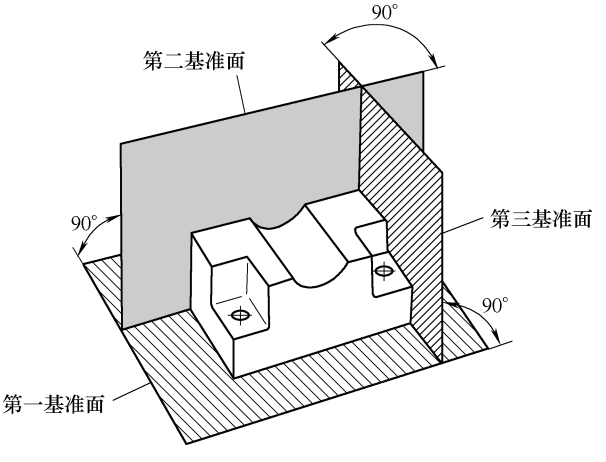


图 2-7-41　三基面体系

2. 几何公差

几何公差是用来限制零件本身几何误差的，是几何特征的实际要素对其理想要素的允许变动（偏离）全量。几何公差分为形状公差、方向公差、位置公差和跳动公差。详细的公差带定义、标注和解释可参照国家标准 GB/T 1182—2008《产品几何技术规范（GPS）　几何公差-形状、方向、位置和跳动公差标注》。

（1）形状公差　形状公差是指单一实际要素的形状所允许的变动全量，包括：直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度和面轮廓度。

1）直线度。直线度是零件上被测直线的不直程度。直线度公差是实际直线对理想直线所允许的最大变动量。用于限制平面内的直线或空间直线的形状误差。

2）平面度。平面度表示面的平整程度，是限制实际表面对理想平面变动量的一项指标。一般来讲，有平面度要求的就不必有直线度要求了，因为平面度是一项综合的形状公差项目，它既可以限制平面度误差，又可以限制被测实际平面上任一方向的直线度误差。

3）圆度。圆度是限制实际圆对理想圆变动量的一项指标。

4）圆柱度。圆柱度是限制实际圆柱面对理想圆柱面变动量的一项指标。

圆柱度公差控制了圆柱体横剖面和轴平面内的各项形状误差，如：圆度、素线直线度、轴线直线度等。因此圆柱度是圆柱体各项形状误差的综合指标。

5）线轮廓度。线轮廓度是对非圆曲线形状的要求，是限制实际曲线对理想曲线变动量的一项指标。线轮廓度的公差带是包络一系列直径为公差值的圆的两包络线之间的区域，各圆的圆心位于具有理论正确几何形状的线上。当线轮廓度无基准要求时属于形状公差，其公差带的形状由理论正确尺寸确定；当其有基准要求时属于方向和位置公差，此时，其公差带的形状由理论正确尺寸确定，公差带位置由基准确定。

6）面轮廓度。面轮廓度是指对曲面形状误差的要求，是限制实际曲面对理想曲面变动量的一项指标。面轮廓度的公差带是包络一系列直径为公差值的球的两包络面之间的区域，各球的球心应位于具有理论正确几何形状的面上。当面轮廓度无基准要求时属于形状公差，其公差带的形状由理论正确尺寸确定，其公差带的位置是浮动的；当其有基准要求时属于方向和位置公差，此时，公差带位置由基准和理论正确尺寸确定，各球球心在固定的理论位置上，公差带不能浮动。

形状公差带是限制实际被测要素变动的一个区域。形状公差带的特点是不涉及基准，不与其他要素发生关系。形状公差带本身没有方向和位置要求，它的方向和位置均是浮动的，只能控制被测要素形状误差的大小。形状公差带可以根据被测要素的实际方向和位置进行平移或转动，只要被测要素位于其中即为合格。

（2）方向公差　方向公差是指被测要素对基准要素的方向允许的变动全量，包括：平行度、垂直度、倾斜度、线轮廓度和面轮廓度。根据被测要素与基准要素各自的几何特征不同，平行度、垂直度和倾斜度有面对面、线对面、面对线和线对线共四种情况。

1）平行度。平行度是限制被测要素对基准在平行方向上变动量的一项指标。

2）垂直度。垂直度是限制被测要素对基准在垂直方向上变动量的一项指标。

3）倾斜度。倾斜度是限制被测要素对基准在倾斜方向上变动量的一项指标，即除了要素间的垂直和平行要求以外的角度要求。

方向公差带具有如下特点：方向公差带相对基准有确定的方向，而其位置是可浮

动的。方向公差带可同时控制被测要素的方向和形状。因此，对被测要素给出方向公差后，通常对该要素不再给出形状公差。如果功能需要对形状精度有进一步要求时，可同时给出形状公差，且形状公差值小于方向公差值。

（3）位置公差　位置公差是指关联被测要素相对于基准要素的位置允许的变动全量，包括：同心度、同轴度、对称度、位置度、线轮廓度和面轮廓度。

1）同心度。当被测要素为圆心（点），或薄型工件上的孔、轴的轴线时，可视作点而不是线，则它们对基准的同轴度称为同心度。

2）同轴度。同轴度是限制被测轴线偏离基准轴线的一项指标。同轴度系要求被测轴线与基准轴线重合，即它们之间的定位尺寸为零。

3）对称度。对称度是限制被测线、面偏离基准直线、平面的一项指标。对称度系要求被测要素与基准要素共面，即它们之间的定位尺寸为零。

4）位置度。位置度是限制被测要素实际位置对理想位置变动量的一项指标。

位置公差带的特点如下：

① 位置公差带相对于基准具有确定的位置，其中，位置度的公差带位置由理论正确尺寸确定，而同轴度和对称度的理论正确尺寸为零，图上可省略不标注。

② 位置公差带具有综合控制被测要素位置、方向和形状的功能。如平面的位置度公差，可以同时控制该平面的平面度误差和相对于基准的方向误差；同轴度公差可同时控制被测轴线的直线度误差和相对于基准轴线的平行度误差。因此，被测要素给出位置公差后，通常对该要素不再给出方向公差和形状公差。如果功能需要对方向和形状有进一步要求时，则另给出方向或（和）形状公差，且方向和形状公差值应小于位置公差值。

（4）跳动公差　跳动公差是指关联被测要素绕基准轴线回转一周或连续回转时所需的最大跳动量，包括圆跳动和全跳动。

1）圆跳动。圆跳动是指被测实际要素在某个测量截面内相对于基准轴的变动量，可分为径向圆跳动、轴向圆跳动和斜向圆跳动。圆跳动仅能反映单个测量平面内被测要素轮廓形状的误差情况，不能反映出整个被测面上的误差。

2）全跳动。全跳动是控制整个被测要素在连续测量时相对于基准轴线的跳动量。可分为径向全跳动和轴向全跳动。跳动公差带可以综合控制被测要素的位置、方向和形状。

3. 公差原则及其应用（GB/T 4249—2009《产品几何技术规范(GPS)　公差原则》，GB/T 16671—2009《产品几何技术规范（GPS）　几何公差　最大实体要求、最小实体要求和可逆要求》）

公差原则定义：机械零件的同一被测要素既有尺寸公差要求，又有几何公差要求，处理两者之间关系应遵循的原则，称为公差原则。公差原则分独立原则和相关要求两大类，如图 2-7-42 所示。

（1）关于公差原则的术语和定义（表 2-7-17）

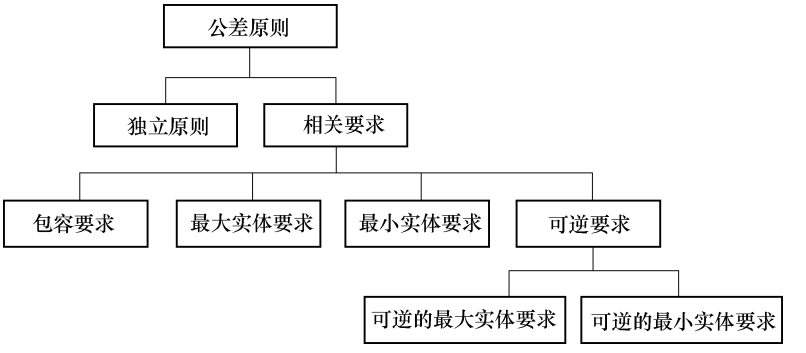


图 2-7-42　公差原则分类

表 2-7-17　公差原则的术语和定义

序　号	术　　语	定　　义
1	尺寸要素	由一定大小的线性尺寸或角度尺寸确定的几何形状
2	实际（组成）要素	由接近实际（组成）要素所限定的工件实际表面的组成要素部分
3	提取组成要素	按规定方法，由实际（组成）要素提取优先数目的点所形成的实际（组成）要素的近似替代
4	提取导出要素	由一个或几个提取组成要素得到的中心点、中心线或中心面
5	拟合组成要素	按规定的方法由提取组成要素形成的并具有理想形状的组成要素
6	提取组成要素的局部尺寸	一切提取组成要素上两对应点之间距离的统称
7	最大实体状态（MMC）	假定提取组成要素的局部尺寸处处位于极限尺寸且使其具有实体最大时的状态
8	最大实体尺寸（MMS）	确定要素最大实体状态的尺寸。即外尺寸要素的上极限尺寸，内尺寸要素的下极限尺寸
9	最小实体状态（LMC）	假定提取组成要素的局部尺寸处处位于极限尺寸且使其具有实体最小时的状态
10	最小实体尺寸（LMS）	确定要素最小实体状态的尺寸。即外尺寸要素的下极限尺寸，内尺寸要素的上极限尺寸
11	最大实体边界（MMB）	最大实体状态的理想形状的极限包容面
12	最小实体边界（LMB）	最小实体状态的理想形状的极限包容面
13	包容要求	包容要求表示提取组成要素不得超越其最大实体边界（MMB），其局部尺寸不得超出最小实体尺寸（LMS）
14	最大实体实效尺寸（MMVS）	尺寸要素的最大实体尺寸与其导出要素的几何公差（形状、方向或位置）共同作用产生的尺寸 对于外尺寸要素：MMVS = MMS + 几何公差 对于内尺寸要素：MMVS = MMS – 几何公差

（续）

序　号	术　　语	定　　义
15	最大实体实效状态（MMVC）	拟合要素的尺寸为其最大实体实效尺寸 MMVS 时的状态
16	最大实体实效边界（MMVB）	最大实体实效状态对应的理想形状的极限包容面
17	最小实体实效尺寸（LMVS）	尺寸要素的最小实体尺寸与其导出要素的几何公差（形状、方向或位置）共同作用产生的尺寸 对于外尺寸要素：LMVS = LMS – 几何公差 对于内尺寸要素：LMVS = LMS + 几何公差
18	最小实体实效状态（LMVC）	拟合要素的尺寸为其最小实体实效尺寸 LMVS 时的状态
19	最小实体实效边界（LMVB）	最小实体实效状态对应的理想形状的极限包容面
20	最大实体要求（MMR）	尺寸要素的非理想要素不得违反其最大实体实效状态（MMVC）的一种尺寸要素要求，也即尺寸要素的非理想要素不得超越其最大实体实效边界（MMVB）的一种尺寸要素要求
21	最小实体要求（LMR）	尺寸要素的非理想要素不得违反其最小实体实效状态（LMVC）的一种尺寸要素要求，也即尺寸要素的非理想要素不得超越其最小实体实效边界（LMVB）的一种尺寸要素要求
22	可逆要求（RPR）	最大实体要求（MMR）或最小实体要求（LMR）的附加要求，表示尺寸公差可以在实际几何误差小于几何公差之间的差值范围内增大
23	体外作用尺寸 （GB/T 16671—1996 术语）	在被测要素的给定长度上，与实际内表面（孔）体外相接的最大理想面，或与实际外表面（轴）体外相接的最小理想面的直径或宽度，称为体外作用尺寸，即通常所称的作用尺寸。对于关联要素孔、轴，该理想面的轴线（或中心平面）必须与基准保持图样上给定的几何关系
24	体内作用尺寸（GB/T 16671—1996 术语）	在被测要素的给定长度上，与实际内表面（孔）体内相接的最小理想面，或与实际外表面（轴）体内相接的最大理想面的直径或宽度，称为体内作用尺寸。对于关联要素孔、轴，该理想面的轴线（或中心平面）必须与基准保持图样上给定的几何关系

（2）独立原则　图样上给定的每一个尺寸和几何（形状、方向或位置）要求均是独立的，应分别满足要求，这种公差原则称为独立原则。遵守独立原则的公差要求，不需要在图样上特别注明。如果对尺寸和几何（形状、方向或位置）要求之间的相互关系有特定的要求，则应在图样上规定。

独立原则是处理尺寸公差与几何公差关系的基本原则。尺寸公差控制提取要素的局部尺寸的变动量；几何公差控制几何误差，互不相关，被测要素应分别满足各自的要求。一般用于对零件的几何公差有其独特的功能要求的场合，主要有：

1）对于尺寸公差与几何公差需要分别满足要求，两者不发生联系的要素，不论两者数值的大小，均采用独立原则。

2）对于除配合要求外，还有极高形位精度要求的要素，其尺寸公差与几何公差的关系应采用独立原则。

3）有功能要求的非配合表面、未注公差表面。

（3）相关要求　图样上给定的尺寸公差和几何公差相互有关的公差要求，称为相关要求。相关要求含包容要求、最大实体要求（MMR）［包括附加于最大实体要求的可逆要求（RPR）］和最小实体要求（LMR）［包括附加于最小实体要求的可逆要求（RPR）］。

1）包容要求。包容要求是指尺寸要素的非理想要素不得违反其最大实体边界（MMB）的一种尺寸要素要求。

① 包容要求的规定：

a. 包容要求适用于圆柱表面或两平行对应面。

b. 包容要求表示提取组成要素不得超越其最大实体边界（MMB），其局部尺寸不得超出最小实体尺寸（LMS）。即：

对于外尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 d_{fe}）≤最大实体尺寸 d_{MMS} = 上极限尺寸 d_{max}，且局部尺寸 $d_a \geqslant$ 最小实体尺寸 d_{LMS} = 下极限尺寸 d_{min}。

对于内尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 D_{fe}）≥最大实体尺寸 D_{MMS} = 下极限尺寸 D_{min}，且局部尺寸 $D_a \leqslant$ 最小实体尺寸 D_{LMS} = 上极限尺寸 D_{max}。

c. 采用包容要求的尺寸要素，应在其尺寸极限偏差或公差带代号之后加注符号Ⓔ。

② 包容要求的主要应用场合：

a. 包容要求常用于保证孔、轴的配合性质，特别是配合公差较小的精密配合要求，用最大实体边界保证所需要的最小间隙或最大过盈。

b. 按包容要求给出单一要素的尺寸公差要求后，若对该要素的形状精度有更高的要求，还可以进一步给出形状公差值，这形状公差值必须小于给出的尺寸公差值。

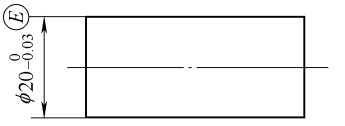
c. 与独立原则、最大实体要求相比，包容要求是一种相对较为严格的要求。

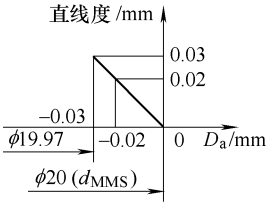
③ 包容要求解读。包容要求是尺寸控制形状误差的一种相关要求，仅适用于单一要素。尺寸控制形状误差主要是通过提取组成要素［实际（组成）要素］必须遵守由尺寸公差形成的最大实体边界这一规定而实现的。

当被测实际要素处于最大实体状态时，必须具有理想形状，不仅有理想形状，而且还应位于正确位置或正确方向上，即此时允许的形状公差为零；当被测实际要素偏离最大实体状态时（由最大实体尺寸向最小实体尺寸偏离），才允许有形状误差，其允许量等于实际要素偏离最大实体状态的偏离量。当被测实际要素处于最小实体状态时，其形状误差的允许的误差值最大，允许值可以达到尺寸公差值。

例：如图 2-7-43 所示，圆柱表面遵守包容要求。圆柱表面必须在最大实体边界内。该边界的尺寸为最大实体尺寸 Φ20mm，其局部实际尺寸在 Φ19.97 ~ Φ20mm 内。

2）最大实体要求（MMR）。最大实体要求是指尺寸要素的非理想要素不得违反其





实际尺寸及允许的误差

被测要素实际尺寸	允许的直线度误差
ϕ20	ϕ0
ϕ19.99	ϕ0.01
ϕ19.98	ϕ0.02
ϕ19.97	ϕ0.03

图 2-7-43　圆柱表面遵守包容要求

最大实体实效状态（MMVC）的一种尺寸要素要求，即尺寸要素的非理想要素不得超越其最大实体实效边界（MMVB）的一种尺寸要素要求。

① 最大实体要求（MMR）用于注有公差的要素。最大实体要求用于注有公差的要素时，应在图样上用符号Ⓜ标注在导出要素的几何公差值之后。

对尺寸要素的表面规定了以下规则：

规则 A：注有公差的要素的提取局部尺寸应满足：

a. 对于外尺寸要素，等于或小于最大实体尺寸（MMS）。

b. 对于内尺寸要素，等于或大于最大实体尺寸（MMS）。

注意，当标有可逆要求（RPR），即在Ⓜ之后加注Ⓡ时，此规则可以改变。

规则 B：注有公差的要素的提取局部尺寸应满足：

a. 对于外尺寸要素，等于或大于最小实体尺寸（LMS）。

b. 对于内尺寸要素，等于或小于最小实体尺寸（LMS）。

规则 C：注有公差的要素的提取组成要素不得违反其最大实体实效状态（MMVC）或其最大实体实效边界（MMVB）。

注意，当几何公差为形状公差时，标注 0Ⓜ与Ⓔ的意义相同。

规则 D：当一个以上注有公差的要素用同一公差标注，或者是注有公差的要素的导出要素标注方向或位置公差时，其最大实体实效状态或最大实体实效边界要与各自基准的理论正确方向或位置相一致。

② 最大实体要求（MMR）用于基准要素。最大实体要求（MMR）应用于基准要素时，应在图样上用符号Ⓜ标注在基准字母之后。

对基准要素的表面规定了以下规则：

规则 E：基准要素的提取组成要素不得违反基准要素的最大实体实效状态（MMVC）或最大实体实效边界（MMVB）。

规则 F：当基准要素的导出要素没有标注几何公差要求，或者注有几何公差但没

有符号Ⓜ时，基准要素的最大实体实效尺寸（MMVS）为最大实体尺寸（MMS）。

规则 G：当基准要素的导出要素注有形状公差，且其后有符号Ⓜ时，基准要素的最大实体实效尺寸由最大实体尺寸 MMS 加上（对外部要素）或减去（对内部要素）该形状公差值。

综合以上规则可以得出：

对于外尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 d_{fe}）≤最大实体实效尺寸 d_{MMVS} = 最大实体尺寸 d_{MMS}（上极限尺寸 d_{max}）+ 形状公差，且最大实体尺寸 d_{MMS}（上极限尺寸 d_{max}）≥局部尺寸 d_a ≥最小实体尺寸 d_{LMS}（下极限尺寸 d_{min}）。

对于内尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 D_{fe}）≥最大实体实效尺寸 D_{MMVS} = 最大实体尺寸 d_{MMS}（上极限尺寸 d_{max}）- 形状公差，且最大实体尺寸 d_{MMS}（下极限尺寸 D_{min}）≤局部尺寸 D_a ≤最小实体尺寸 D_{LMS}（上极限尺寸 D_{max}）。

③ 最大实体要求解读。最大实体要求是注有公差的要素或（和）基准要素偏离最大实体状态，而几何公差获得补偿的一种公差原则。最大实体要求是从材料外对非理想要素进行限制，使用的目的主要是为了保证可装配性。当给定的几何公差值为 0 时也标注成 0Ⓜ。

a. 当最大实体要求应用于注有公差的要素时，要素的几何公差值是在该要素处于最大实体状态时给定的。当提取组成要素偏离其最大实体状态时（由最大实体尺寸向最小实体尺寸偏离），其几何误差值允许增大（可以超出在最大实体状态下给出的几何公差值，实质上相当于几何公差值可以得到补偿），其允许量等于提取组成要素偏离最大实体状态的偏离量。当提取组成要素处于最小实体状态时，其几何误差的允许量最大，允许值可以达到尺寸公差值，即最大实体尺寸与最小实体尺寸之差。

b. 当最大实体要求应用于基准要素，而基准要素本身也遵守最大实体要求时，被测要素的方向或位置公差值是在基准要素处于最大实体实效状态时给定的。如基准要素偏离最大实体实效状态，被测要素的方向或位置公差值允许增大，其允许量等于基准要素偏离最大实体实效状态的偏离量。当基准要素处于最小实体实效状态时，其允许量最大，允许值可以达到最大实体实效尺寸与最小实体实效尺寸之差。

c. 当最大实体要求应用于基准要素，而基准要素本身未标注要求或要遵守包容要求时，则被测要素的方向或位置公差值是在该基准要素处于最大实体状态时给定的。如基准要素偏离最大实体状态时，被测要素的方向或位置公差值允许增大，其允许量等于基准要素偏离最大实体状态的偏离量。当基准要素处于最小实体状态时，其允许量最大，允许值可以达到基准要素最大实体尺寸与最小实体尺寸之差。

例 1：如图 2-7-44 所示，表示轴的直线度采用最大实体要求，当被测要素处于最大实体状态 $d_a = \phi 20$mm 时，轴线直线度公差值为 $\phi 0.1$mm；该轴满足以下要求：实际尺寸在 $\phi 19.7 \sim \phi 20$mm 范围内；应遵守的边界为最大实体实效边界，最大实体实效尺寸 MMVS 为 20.1mm；当被测要素处于最小实体状态 $d_a = \phi 19.7$mm 时，轴线直线度误差允许值为直线度公差值 $\phi 0.1$mm + 尺寸公差值 0.3mm = $\phi 0.4$mm，最大实体实效尺寸

仍为 20.1mm。

例 2：如图 2-7-45 所示，表示孔的轴线对于基准 A 的垂直度采用最大实体要求，当被测要素处于最大实体状态 D_a = ϕ50mm 时，其轴线对于基准 A 的垂直度公差值为 ϕ0.08mm。该孔满足以下条件：实际尺寸在 ϕ50 ~ ϕ50.13mm 范围内；应遵守的边界为最大实体实效边界，最大实体实效尺寸 MMVS 为 49.92mm；当被测要素处于最小实体状态 D_a = 50.13mm 时，其轴线对于基准 A 的垂直度公差值允许值为垂直度公差值 ϕ0.08mm + 尺寸公差值 0.13mm = ϕ0.21mm。

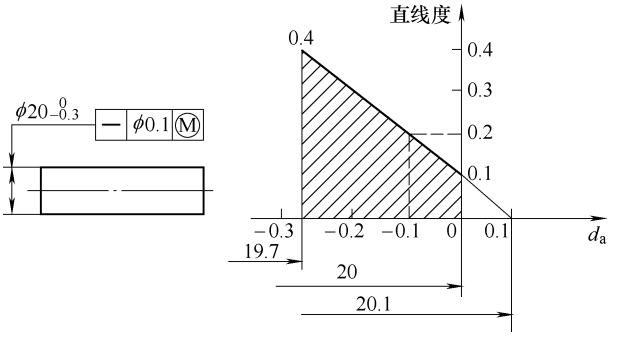


图 2-7-44　轴的直线度采用最大实体要求

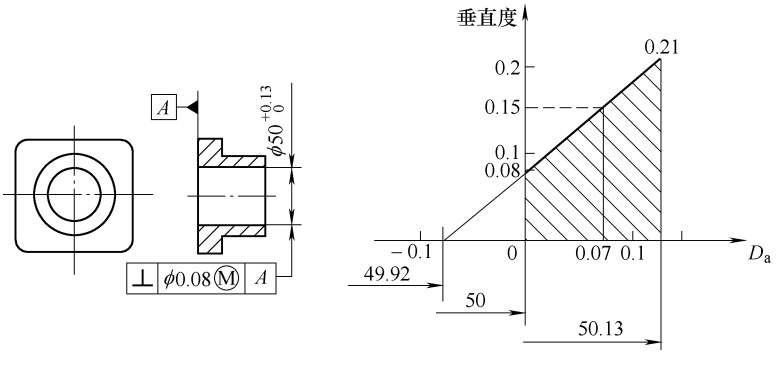


图 2-7-45　孔的轴线对于基准的垂直度采用最大实体要求

例 3：如图 2-7-46 所示，被测要素采用最大实体要求，当被测要素处于最大实体状态时，其轴线与基准 A 轴线的同轴度公差为 ϕ0.04mm；满足以下要求：被测要素实际尺寸在 ϕ11.95 ~ ϕ12mm 范围内；应遵守的边界为最大实体实效边界，最大实体实效尺寸 MMVS 为 12.04mm；当被测要素处于最小实体状态 d_a = 11.95mm 时，其轴线与基准 A 轴线的同轴度误差允许值可增大到同轴度公差值 ϕ0.04mm + 尺寸公差值0.05mm = ϕ0.09mm。

基准要素采用最大实体要求，当实际基准要素处于最大实体状态时，即基准要素的实际尺寸为最大实体尺寸 ϕ25mm 时，它的基准轴线不能浮动，被测要素遵守最大实体实效边界，在实际尺寸偏离最大实体尺寸直到最小实体尺寸 11.95mm，其轴线与基准 A 轴线的同轴度误差允许值可增大到同轴度公差值 ϕ0.04mm + 尺寸公差值 0.05mm = ϕ0.09mm。当基准要素的实际尺寸偏离最大实体状态时，其轴线可在直径为基准 A 尺寸偏移量的圆柱范围内浮动，同时允许增大被测要素轴线相对于基准轴线的同轴度公差。当基准要素的实际尺寸处于最小实体状态时，基准轴线的浮动范围达到最大值 ϕ0.05mm。

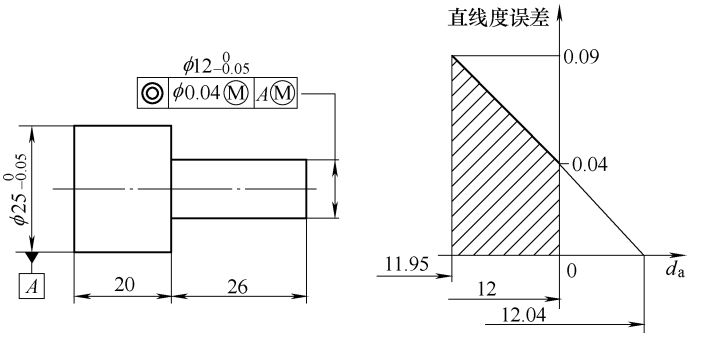


图 2-7-46　被测要素采用最大实体要求

3）最小实体要求（LMR）。最小实体要求是指尺寸要素的非理想要素不得违反其最小实体实效状态（LMVC）的一种尺寸要素要求，也即尺寸要素的非理想要素不得超越其最小实体实效边界（LMVB）的一种尺寸要素要求。

当最小实体要求应用于被测要素时，被测要素的几何公差是在该要素处于最小实体状态时给出的，当被测要素的实际轮廓偏离其最小实体状态，即其实际尺寸与最小实体尺寸偏离时，其几何误差可以超出在最小实体状态下给出的几何公差值，即几何误差值可以增大。当提取组成要素处于最大实体状态时，其几何误差的允许量最大，允许值可以达到尺寸公差值。最小实体要求应用于被测要素时，被测要素的实际轮廓在给定的长度上处处不得超出最小实体实效边界，即其提取组成要素体内作用尺寸不应超出最小实体实效尺寸，其局部尺寸不得超出最大实体尺寸和最小实体尺寸。

对于外尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 d_{fi}）≥最小实体实效尺寸 d_{LMVS} = 最小实体尺寸 d_{LMS}（下极限尺寸 d_{min}）－形状公差，且最大实体尺寸 d_{MMS}（上极限尺寸 d_{max}）≥局部尺寸 d_a ≥最小实体尺寸 d_{LMS}（下极限尺寸 d_{min}）。

对于内尺寸要素：提取组成要素尺寸（作用尺寸 D_{fi}）≤最小实体实效尺寸 D_{LMVS} = 最小实体尺寸 D_{LMS}（上极限尺寸 D_{max}）＋形状公差，且最小实体尺寸 D_{LMS}（上极限尺寸 D_{max}）≥局部尺寸 D_a ≥最大实体尺寸 D_{MMS}（下极限尺寸 D_{min}）。

当基准要素本身采用最小实体要求时，其相应的边界为最小实体实效边界；基准要素本身不采用最小实体要求时，其相应的边界为最小实体边界。

最小实体要求可应用于被测要素时，应在被测要素几何公差框格中的公差值后面标注符号Ⓛ，最小实体要求可应用于基准要素时，应在几何公差框格中相应的基准字母代号后标注符号Ⓛ。

例：如图 2-7-47 所示，表示孔的轴线对于基准 A 的位置度采用最小实体要求，当被测要素处于最小实体状态 $D_a = \phi8.25$mm 时，其轴线对于基准 A 的位置度公差值为 $\phi0.4$mm。该孔满足以下条件：实际尺寸在 $\phi8 \sim \phi8.25$mm 范围内；应遵守的边界为最小实体实效边界，最小实体实效尺寸 LMVS 为 8.25mm + 0.4mm = 8.65mm；当

被测要素处于最大实体状态 $D_a = \phi 8\text{mm}$ 时，其轴线对 A 基准的位置度误差允许达到最大值，等于图样中给出的位置度公差 $\phi 0.4\text{mm}$ 与孔尺寸公差 0.25mm 之和 $\phi 0.65\text{mm}$。

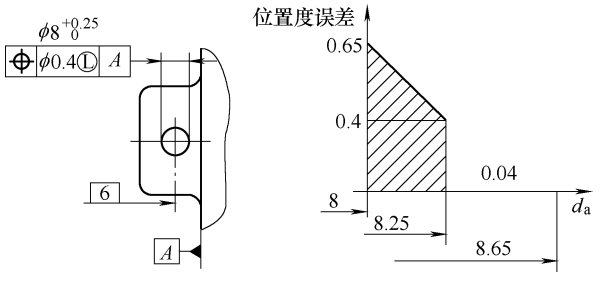


图 2-7-47　孔的轴线对于基准的位置度采用最小实体要求

4）可逆要求（RPR）。可逆要求是最大实体要求（MMR）或最小实体要求（LMR）的附加要求，表示尺寸公差可以在实际几何误差小于几何公差之间的差值范围内增大。可逆要求不单独使用，而应用于最大实体要求和最小实体要求，称为可逆的最大实体要求和可逆的最小实体要求。

① 可逆要求用于最大实体要求时，除了具有最大实体要求用于被测要素时的含义外，还表示当几何误差小于给定的几何公差时，实际要素的尺寸公差值可以得到补偿，允许实际尺寸超出最大实体尺寸，补偿值等于几何公差减几何误差；当几何误差为零时，允许尺寸的超出量最大，为几何公差值，从而实现尺寸公差与几何公差相互转换的可逆要求。此时，被测要素仍然遵循最大实体实效尺寸。

② 可逆要求用于最小实体要求时，除了具有最小实体要求用于被测要素时的含义外，还表示当几何误差小于给定的几何公差时，实际要素的尺寸公差值可以得到补偿，允许实际尺寸超出最小实体尺寸，补偿值等于几何公差减几何误差；当几何误差为零时，允许尺寸的超出量最大，为几何公差值，从而实现尺寸公差与几何公差相互转换的可逆要求。此时，被测要素仍然遵循最小实体实效尺寸。

可逆要求是一种反补偿要求，仅用于注有公差的要求。在图样上的符号 Ⓜ 或 Ⓛ 后加注带圆圈的符号 Ⓡ。

例：如图 2-7-48 所示，当轴线的直线度误差小于图上给定的 $\phi 0.05\text{mm}$ 时，如为 $\phi 0.03\text{mm}$ 时，则允许其实际尺寸大于最大实体尺寸 $\phi 20\text{mm}$ 而达到 $\phi 20.02\text{mm}$，当直线度误差为零时，轴的实际尺寸可达到最大值，即等于最大实体实效边界尺

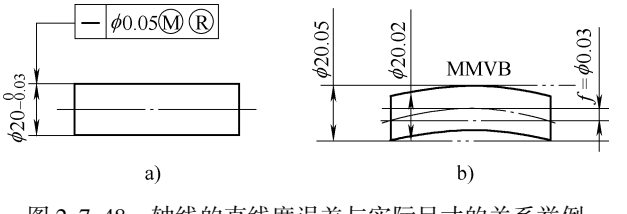


图 2-7-48　轴线的直线度误差与实际尺寸的关系举例

寸 ϕ20.05mm。

4. 几何公差在图样上的标注

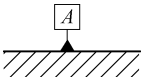
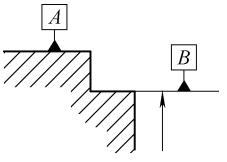
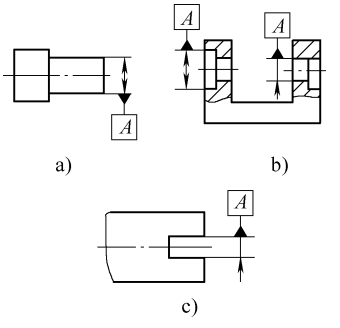
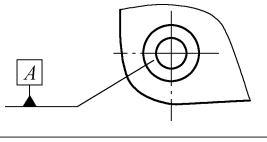
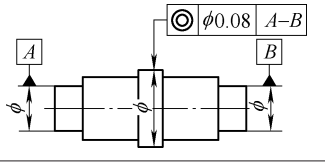
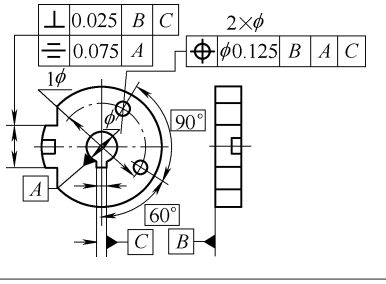
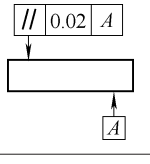
在技术图样中，通常几何公差采用代号标注，当无法采用代号标注时，才允许在图样的技术要求中用文字说明。

几何公差代号标注方法见表 2-7-18。

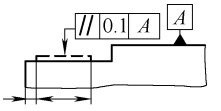
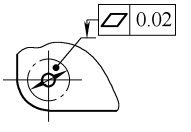
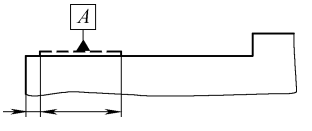
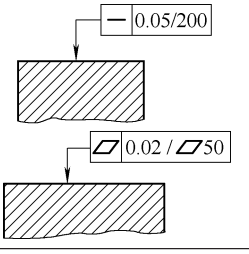
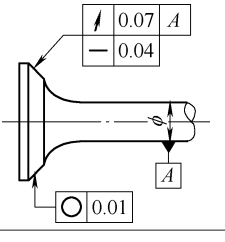
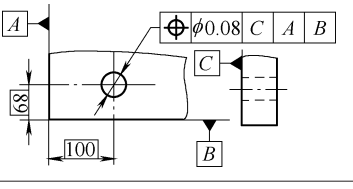
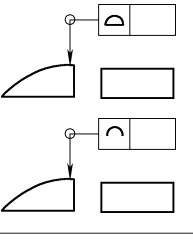
表 2-7-18　几何公差代号标注方法

类　别		图　示	说　明
矩形公差框格及指引线		第一格填写形位公差特征符号 第二格填写公差数值及有关符号 第三格及其后填写基准字母及附加符号 ϕ0.02 Ⓟ B A	① 矩形公差框格由两格或多格组成，框格自左向右填写 ② 矩形公差框格及指引线均由细实线组成 ③ 公差框格的指引线与有关的被测要素相连接，指引线一般从框格的左端或右端引出，也可从侧面直接引出，但必须垂直于框格，指引线的箭头应指向公差带的宽度方向或直径方向
被测要素的标注	为组成要素时	a) b)	指引线的箭头应指在被测表面的可见轮廓线上，也可指在轮廓线的延长线上，但必须与尺寸线错开
	为导出要素时	a)　b) c)	① 导出要素是指中心点、圆心、轴线、中心线及中心平面 ② 指引线的箭头应与尺寸线的延长线相重合
	指向实际表面时		可在实际表面（表面形状的投影）上用小黑点引出参考线，指引线的箭头指在参考线上

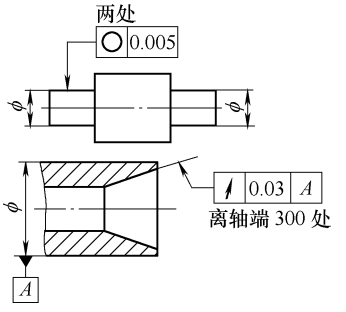
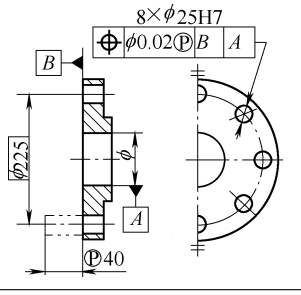
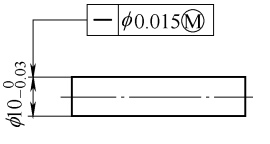
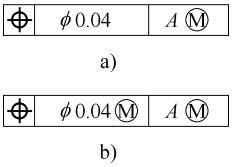
（续）

类别		图示	说明
基准要素的标注	基准符号		用细实线将写有大写基准字母的细线方框及三角形相连，组成基准符号
	基准为组成要素时		基准符号中的三角形应靠近基准要素的轮廓线或轮廓面，也可靠近轮廓的延长线，但不能与尺寸线对齐
	基准要素为导向要素时		① 导向要素是指轴线中心平面或带尺寸要素确定的点 ② 基准符号中的细实线应与尺寸线对齐，基准符号中的三角形也可以代替尺寸线的箭头
	基准符号必须在某个面时		可在面上画出小黑点，由黑点引出参考线，基准符号置于参考线上
由两个要素组成的公共基准的标注			在公差框格中标注用横线隔开的两个大写字母，如左图中标注的“*A-B*”
由两个或三个要素组成的基准体系的标注			在公差框格中标注出代表基准的大写字母，并按基准的优先顺序从左至右分别注写在各格中。 注意：为不致引起误解，表示基准的大写字母不采用 E、F、I、J、L、M、O、P、R
任选基准的标注			所谓任选基准，表示被测要素与基准要素可以相互交换，因此，基准符号中的短横线改用箭头，表示也可以当成被测要素

（续）

类　别		图　示	说　明
限定范围的标注	被测要素为局部时	 a)	如对被测要素的某一部分给定几何公差的要求，或以要素的某一部分作为基准，则用粗点画线表示其范围，并加注尺寸
	基准要素为局部时	 b)	
对形位公差值有附加说明的标注			表示在任一 200mm 长度上，直线度公差为 0.05mm
			表示在任一 50mm × 50mm 的正方形表面上，平面度公差为 0.02mm
同一被测要素有多项形位公差要求时的标注			同一要素有多项几何公差要求时，可在一条指引线的末端画出多个框格标注。若测量方向不一致时，不能合用同一条指引线，应分开标注
理论正确尺寸标注			对于要素的位置度、轮廓度、倾斜度，其尺寸由不带公差的理论正确位置、轮廓、角度确定时，这种尺寸称为“理论正确尺寸”。在图样上理论正确尺寸用方框围住
全周符号表示法			若几何公差特征项目（如轮廓度公差）适用于横截面内的整个外轮廓或整个外轮廓面，应采用全周符号。可在公差框格指引线的弯折处画出一个小圆圈

（续）

类　别	图　示	说　明
公差框格处加文字说明		为了说明公差框格中所标注的几何公差的附加要求，或为了简化标注方法，可以在公差框格的上方或下方附加文字说明。属于被测要素数量的说明应写在公差框格的上方，属于解释性的说明应写在下方
延伸公差带的标注		延伸公差带是将被测要素的公差带延伸到工作实体之外，控制工件外部的公差带，以保证相配零件与该零件配合时能顺利装入。延伸公差带用Ⓟ表示，并用点画线绘出延伸部分，标出其长度尺寸
最大实体要求的标注		最大实体要求用符号Ⓜ表示，放在公差框格中公差值的后面。如左图所示，圆柱体轴线的直线度公差为ϕ0.015mm，其最大实体实效边界尺寸为ϕ10.015mm
		若基准要素也有最大实体要求，则在基准要素字母后加Ⓜ

二、表面结构要求简介

1. 概述

（1）表面结构的概念　用任何机械加工方法获得的零件表面，都不会是绝对的光滑平整，由于不同的加工方法导致的刀具切削后留下的刀痕、切屑分离时金属材料的塑性变形、工艺系统中存在振动及刀具和零件加工表面之间的摩擦等原因，造成被加工表面存在着宏观和微观的几何形状误差。零件加工表面具有这种较小间距的峰和谷的微观几何形状特征，称为表面结构的粗糙度，即表面粗糙度。表面结构是表面粗糙度、表面波纹度、表面缺陷、表面几何形状的总称。

零件在加工后的表面粗糙度轮廓是否符合要求，应由测量和评定它的结果来确定。测量和评定表面粗糙度轮廓时，应规定取样长度、评定长度、中线和评定参数。为了合理评定加工后零件的表面粗糙度，国家标准 GB/T 3505—2009《产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 术语、定义及表面结构参数》、GB/T 1031—2009《产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》规定了轮廓法评定表面粗糙度的术语定义、参数及其数值。

（2）表面粗糙度对零件使用性能的影响 零件表面粗糙度值越小，则表面越光滑。表面粗糙度值的大小对零件的使用性能和使用寿命有很大影响，尤其对高温、高速、高压条件下工作的机械零件其影响更大，主要表现在以下几个方面：

1）对耐磨性的影响。具有微观几何形状误差的两个表面只能在轮廓峰顶处接触，一般来说，相互运动的两个零件表面越粗糙，两配合表面之间的实际有效接触面积就越小，导致单位面积上压力增大，表面磨损加剧；表面越粗糙，摩擦因数就越大，摩擦阻力越大，因摩擦而消耗的能量也越大，零件的磨损也越快。因此降低零件表面粗糙度值，可以减少摩擦损失，提高传动效率，延长机器的使用寿命。但是，如果表面粗糙度值要求过小，零件的表面过于光滑，一方面会增加制造成本，另一方面由于配合表面过于光洁，加大了接触表面金属分子间的吸附力，且不利于润滑油的储存，容易使相互配合的工作面间形成半干摩擦甚至干摩擦，反而使摩擦因数增大，使金属接触面产生胶合磨损而损坏。

2）对配合性质稳定性的影响。对于有配合要求的零件表面，粗糙表面上的微小波峰被去掉后，它们的配合性质会发生变化。对于间隙配合，在零件相对运动的过程中配合表面上的微小峰被磨去，使间隙增大，因而影响或改变原设计的配合性质。配合间隙的尺寸越小，这种影响就越严重。对于过盈配合，装配时配合表面上的微小波峰将被挤平而使实际有效过盈量减小，从而降低了零件的连接强度；对于过渡配合，零件会在使用和拆装过程中发生磨损，使配合变松，降低了定位和导向的精度。上述微观凸峰被磨损或被挤平的现象，对那些配合稳定性要求较高、配合间隙过盈量较小以及高速重载机械影响更显著。

3）对疲劳强度的影响。零件表面越粗糙，表面刀痕、裂纹等微观不平整的凹痕越深，其根部曲率半径越小，对应力集中越敏感，特别是在交变应力的作用下，影响更大，往往在零件表面轮廓的微小谷底处产生疲劳裂纹而使零件失效，所以，对于承受交变载荷、重载荷及高速工作条件下的零件，提高其表面质量，降低表面粗糙度值，可提高其疲劳强度。

4）对抗腐蚀性的影响。由于腐蚀性气体或液体容易积存在波谷底部，并通过表面的微观凹谷向零件表层渗透。零件表面越粗糙，凹谷越深，则聚集在零件表面上的腐蚀性物质也越多，腐蚀作用就越严重。因此，减小零件的表面粗糙度值可以增强其抗腐蚀的能力。

5）对密封性的影响。静力密封时，粗糙的零件表面之间无法严密地贴合，容易使气体或液体通过接触面间的微小缝隙发生渗漏；对于动力密封，其配合面的表面粗糙度值也不能过低，否则受压会破坏油膜，从而失去润滑作用。

6）对接触刚度的影响。表面粗糙度影响零件的接触刚度。零件接触刚度是零件接合面在外力作用下抵抗接触变形的能力。零件表面越粗糙，两接合表面之间的实际有效接触面积就越小，在外载荷作用下表层越容易出现塑性变形，从而使零件接合表层的接触刚度降低。机器的刚度在很大程度上取决于各零件之间的接触刚度。

2. 表面粗糙度的选择

表面粗糙度的选择主要是指评定参数的选择和参数值的确定。正确地选用表面粗糙度参数对保证零件表面质量及使用功能十分重要。选择原则是在满足零件表面使用功能要求的前提下，尽可能考虑加工工艺的可能性、经济性、检测的方便性及仪器设备条件等因素。

（1）评定表面结构参数的选择　在国家标准 GB/T 1031—2009 中规定了评定表面粗糙度的参数及其数值和规定表面粗糙度时的一般规定。标准中给出了轮廓算术平均偏差 *Ra*，轮廓最大高度 *Rz* 等参数。在表面粗糙度的评定参数中，两个 *Ra*、*Rz* 高度幅度特征参数为基本参数。参数 *Ra*、*Rz* 的数值越大，则零件表面越粗糙。*Ra* 参数能客观地反映表面微观几何形状误差，是通常优先选用的评定参数。

1）基本参数 *Ra*、*Rz* 的选择。幅度参数是标准规定的基本参数，可以独立选用，如零件无特殊要求，一般仅选用幅度参数。幅度参数的选用原则如下：

① 在常用的幅度参数值范围内（$Ra = 0.025 \sim 6.3\mu m$，$Rz = 0.1 \sim 25\mu m$）范围内，标准推荐 *Ra*。当表面粗糙度值要求特别高或特别低时不宜采用 *Ra*。

② 对于 $Ra > 6.3\mu m$ 和 $Ra < 0.025\mu m$ 范围内的零件表面，多采用 *Rz*。

③ 当零件表面不允许有较深加工痕迹，防止应力集中，要求保证零件的疲劳强度和密封性时，需选 *Rz* 或同时选用 *Ra* 和 *Rz*。

④ 当被测表面面积太小，难以取得一个规定的取样长度，不适宜采用 *Ra* 评定时，也常选用 *Rz* 作为评定参数。

⑤ 零件材料较软时，不能选用 *Ra*，因为 *Ra* 值常采用针描法进行测量，针描法用于测量软材料，可能会划伤被测表面，而且也会影响测量结果的准确性。

2）表面粗糙度值。表面粗糙度值应按国家标准 GB/T 1031—2009 规定的数值系列选取。轮廓算术平均偏差 *Ra*、轮廓最大高度 *Rz* 的数值系列分别见表 2-7-19 和表 2-7-20。

表 2-7-19　轮廓算术平均偏差 *Ra* 的数值　（单位：μm）

Ra	0.012	0.2	3.2	50
	0.025	0.4	6.3	100
	0.05	0.8	12.5	
	0.1	1.6	25	

表 2-7-20　轮廓最大高度 *Rz* 的数值

Rz	0.025	0.4	6.3	100	1600
	0.05	0.8	12.5	200	
	0.1	1.6	25	400	
	0.2	3.2	50	800	

（2）表面粗糙度值的选择　表面粗糙度值选择得合理与否，直接关系到机器的使用性能、使用寿命和制造成本。一般来说，表面粗糙度值越小，零件的工作性能越好，使用寿命也越长。但绝不能认为表面粗糙度值越小越好。因为表面粗糙度值越小，零件的加工越困难，加工成本也越高，而且对某些情况而言，表面粗糙度值过小，反而会影响使用性能。所以应综合考虑零件的功能要求和制造成本，合理选择表面粗糙度值。总的选择原则是：在满足零件功能要求的前提下，尽量选用较大的表面粗糙度值，以降低加工成本。在实际应用中，通常采用类比法初步确定表面粗糙度值，然后再对比工作条件做适当调整。调整时应考虑以下原则：

1）同一零件上，工作表面的表面粗糙度值小于非工作表面的表面粗糙度参数值。尺寸精度高的部位，其表面粗糙度值应比尺寸精度低的部位小。

2）摩擦表面的表面粗糙度值比非摩擦表面小；滚动摩擦表面比滑动摩擦表面的表面粗糙度值要小。其相对速度越高，单位面积压力越大，表面粗糙度值应越小。

3）受循环载荷作用的重要零件的表面及易引起应力集中的部分（如圆角、沟槽、台肩等），其表面粗糙度值应较小。

4）要求配合性质稳定可靠时，其配合表面的表面粗糙度值应较小。特别是小间隙的间隙配合和承受重载荷、要求连接强度高的过盈配合，其配合表面的表面粗糙度值应小一些。一般情况下，间隙配合比过盈配合的表面粗糙度值要小。配合性质相同，零件尺寸越小，表面粗糙度值应越小；表面粗糙度值与配合间隙或过盈的关系见表 2-7-21。

表 2-7-21　表面粗糙度值与配合间隙或过盈的关系

间隙或过盈量/μm	表面粗糙度值 *Ra*/μm	
	轴	孔
≤2.5	0.1～0.2	0.2～0.4
>2.5～4	0.2～0.4	0.4～0.8
>4～6.5		0.8～1.6
>6.5～10	0.4～0.8	1.6～3.2
>10～16	0.8～1.6	
>16～25		
>25～40	1.6～3.2	3.2～6.3

5）同一公差等级其他条件相同时，小尺寸表面比大尺寸表面的表面粗糙度值要小，轴表面比孔表面的表面粗糙度值要小。

6）要求防腐蚀、密封性能好或外表美观的表面，其表面粗糙度值应较小。

7）凡有标准对零件的表面粗糙度值作出具体规定的，则应按标准的规定确定表面粗糙度值，如与滚动轴承配合的轴颈和外壳孔的表面粗糙度值。

8）表面粗糙度值应与尺寸公差及几何公差相协调。通常情况下，尺寸公差和几何公差值越小，表面粗糙度的 *Ra* 或 *Rz* 值应越小。一般应符合：尺寸公差 > 几何公差 >

表面粗糙度值。在正常工艺条件下，表面粗糙度 Ra、Rz 值与尺寸公差 T 和形状公差 t 的对应关系参见表 2-7-22。但是尺寸公差、形状公差、表面粗糙度值之间并不存在确定的函数关系。有些零件尺寸精度和几何精度要求不高，但表面粗糙度值却要求很小。例如，为了避免应力集中，提高疲劳强度，对某些非配合轴颈表面和转接圆处，应要求较小的表面粗糙度值。又如，某些装饰表面和工作时与人们肉体相接触的表面（如仪表框、操作手轮或手柄、手术工具等），也应规定较小的表面粗糙度值。

表 2-7-22　表面粗糙度值与尺寸公差和几何公差的关系

几何公差与尺寸公差的关系	Ra 与 T 的关系	Rz 与 T 的关系
$t \approx 0.6T$	$Ra \leqslant 0.05T$	$Rz \leqslant 0.2T$
$t \approx 0.4T$	$Ra \leqslant 0.025T$	$Rz \leqslant 0.1T$
$t \approx 0.25T$	$Ra \leqslant 0.012T$	$Rz \leqslant 0.05T$
$t < 0.25T$	$Ra \leqslant 0.15T$	$Rz \leqslant 0.6T$

表面粗糙度的表面特征、经济加工方法及应用举例见表 2-7-23，供参考。

表 2-7-23　表面粗糙度的表面特征、经济加工方法及应用举例

Ra/μm	Rz/μm	表面形状特征		加工方法	应用举例
>20～40	>80～160	粗糙	可见刀痕	粗车、粗刨、粗铣、钻、毛锉、锯断	粗加工表面，非配合的加工表面，如轴端面、倒角、钻孔、齿轮和带轮侧面、键槽底面、垫圈接触面等
>10～20	>40～80		微见刀痕		
>5～10	>20～40	半光	可见加工痕迹	车、刨、铣、钻、镗、粗铰	轴上不安装轴承、齿轮处的非配合表面，紧固件的自由装配表面，轴和孔的退刀槽等
>2.5～5	>10～20		微见加工痕迹	车、刨、铣、镗、磨、拉、粗刮、滚压	半精加工面，支架，箱体，盖面、套筒等和其他零件连接而无配合要求的表面，需要发蓝的表面等
>1.25～2.5	>6.3～10		看不清加工痕迹	车、刨、铣、镗、磨、拉、刮、铣齿	接近于精加工表面，箱体上安装轴承的镗孔表面、齿轮齿工作面等
>0.63～1.25	>3.2～6.3	光	可辨加工痕迹的方向	车、镗、磨、拉、刮、精铰、磨齿、滚压	圆柱销、圆锥销，与滚动轴承配合的表面，普通车床导轨表面，内、外花键定心表面、齿轮齿面等
>0.32～0.63	>1.6～3.2		微辨加工痕迹的方向	精镗、磨、刮、精铰、滚压	要求配合性质稳定的配合表面，工作时承受交变应力的重要表面，较高精度车床导轨表面、高精度齿轮齿面等
>0.16～0.32	>0.8～1.6		不可辨加工痕迹的方向	精磨、珩磨、研磨、超精加工	精密机床主轴圆锥孔、顶尖圆锥面，发动机曲轴轴颈和凸轮轴的凸轮工作表面，高精度齿轮齿面等

（续）

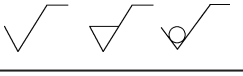
Ra/μm	*Rz*/μm	表面形状特征		加工方法	应用举例
>0.08～0.16	>0.4～0.8	极光	暗光泽面	精磨、研磨、普通抛光	精密机床主轴轴颈表面，一般量规工作表面，气缸套内表面，活塞销表面等
>0.04～0.08	>0.2～0.4		亮光泽面	超精磨、精抛光、镜面磨削	精密机床主轴轴颈表面，滚动轴承滚珠表面，高压液压泵中柱塞和柱塞孔的配合表面等
>0.01～0.04	>0.05～0.2		镜状光泽面		特别精密的滚动轴承套圈滚道、钢球及滚子表面，高压液压泵中的柱塞和柱塞套的配合表面，保证高度气密的结合表面等
≤0.01	≤0.05		镜面	镜面磨削、超精研	高精度量仪、量块的测量面，光学仪器中的金属镜面等

3. 表面结构要求的标注

国家标准 GB/T 131—2006《产品几何技术规范（GPS） 技术产品文件中表面结构的表示法》规定了技术产品文件（图样、说明书、合同、报告等）中表面结构的表示法。确定零件表面粗糙度轮廓评定参数及允许值和其他技术要求后，应按照国家标准 GB/T 131—2006 的规定，把表面粗糙度轮廓技术要求正确地标注在零件图上。

（1）表面结构要求的图形符号　为了标注表面粗糙度轮廓各种不同的技术要求，国家标准 GB/T 131—2006 规定了一个基本图形符号、两个扩展图形符号和三个完整图形符号，见表 2-7-24。

表 2-7-24　表面结构要求的图形符号

符　号	含　义
	基本图形符号，未指定工艺方法的表面。当通过一个注释解释时可单独使用
	扩展图形符号，用去除材料的方法获得的表面；仅当其含义是“被加工表面”时可单独使用
	扩展图形符号，不去除材料的表面，也可用于表示保持上道工序形成的表面，不管这种状况是通过去除材料或不去除材料形成的
	完整图形符号，用于标注有关参数和说明

（2）表面结构要求在完整图形符号上的注写

1）在完整图形符号上的注写位置。在完整图形符号中，对表面粗糙度评定参数的

符号及极限值和其他技术要求应标注在图 2-7-49 所示的指定位置。此图为在去除材料的完整图形符号上的标注。

在完整图形符号各个指定位置上分别注写下列技术要求：

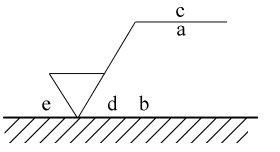


图 2-7-49　表面粗糙度轮廓技术要求的标注位置

位置 a：注写表面结构的单一要求。当有两个以上的多个表面结构要求时，在此注写第一个表面结构要求。如注写幅度参数符号（*Ra* 或 *Rz*）及极限值（μm）和有关技术要求。

位置 b：当有两个以上的多个表面结构要求时，在位置 b 注写第二个表面结构要求或更多个表面结构要求。如注写附加评定参数的符号及相关数值。

位置 c：注写加工方法、表面处理、涂层或其他加工工艺要求，如车、磨、镀等加工表面。

位置 d：注写要求的表面纹理和纹理的方向，标注采用符号方法。

位置 e：注写加工余量（以 mm 为单位给出数值）。

2）表面纹理的标注。纹理方向是指表面纹理的主要方向，通常由加工工艺决定。典型的表面纹理及其方向用规定的符号（图 2-7-50）标注在完整符号中（图 2-7-49

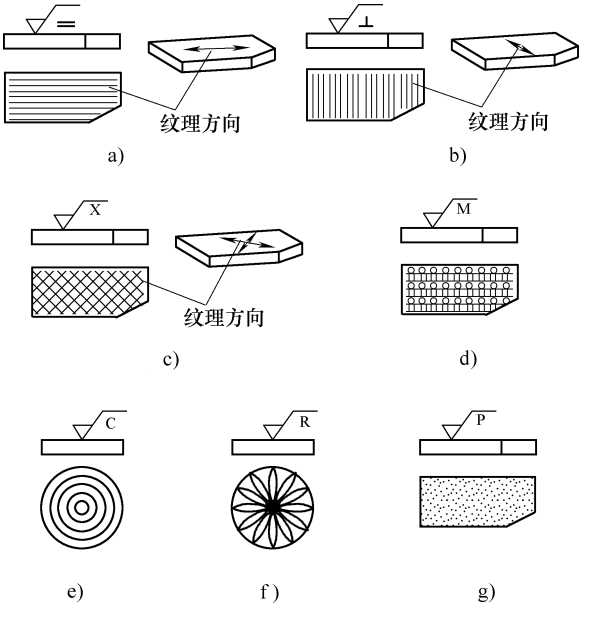


图 2-7-50　表面纹理方向符号及标注图例

a）纹理平行于视图所在的投影面　b）纹理垂直于视图所在的投影面　c）纹理呈两斜向交叉且与视图所在的投影面相交　d）纹理呈多方向　e）纹理呈近似同心圆且圆心与表面中心相关　f）纹理呈近似放射状且与表面圆心相关　g）纹理呈微粒、凸起、无方向

中的位置 d 处）。如果这些符号不能清楚地表示表面纹理要求，可以在零件图上加注说明。采用定义的符号标注表面纹理不适用于文本标注。

3）加工余量的标注。在同一图样中有多个加工工序的表面可标注加工余量，如图 2-7-51 所示，车削工序的直径方向的加工余量为 0.4mm，其余技术要求均采用默认。

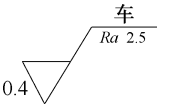


图 2-7-51　加工余量的标注

4）表面结构代号及其含义。表面结构代号是指在周围注写了技术要求的完整图形符号，其含义（解释）见表 2-7-25。

表 2-7-25　表面结构代号的含义（解释）

表面结构代号	含义（解释）
Rz 0.4	表示不允许去除材料，单向上限值，默认传输带，粗糙度的最大高度 0.4μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
Rz_{max} 0.2	表示去除材料，单向上限值，默认传输带，粗糙度的最大高度 0.2μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
0.008 – 0.8/Ra 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带 0.008 ~ 0.8mm，算术平均偏差 3.2μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
– 0.8/Ra3 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带根据国家标准 GB/T 6062，取样长度 0.8μm，算术平均偏差 3.2μm，评定长度包含 3 个取样长度，“16% 规则”（默认）

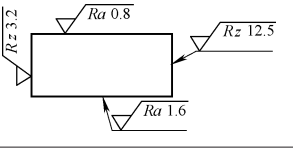
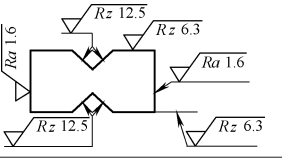
（3）表面结构要求在图样上的标注方法（见表 2-7-26）　表面结构要求在图样中的标注基本原则如下：

1）表面结构要求对每一表面一般只标注一次（包括重复要素），并尽可能标在相应尺寸及其公差的同一视图上。

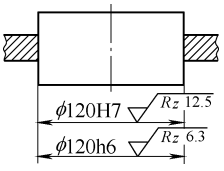
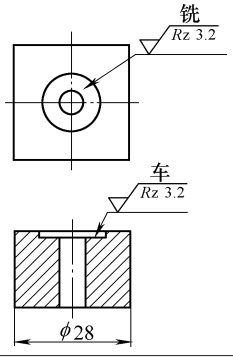
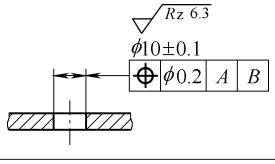
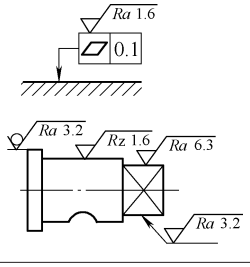
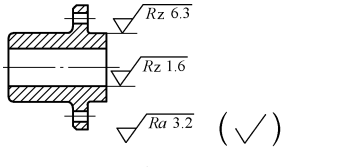
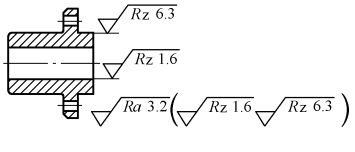
2）除非另有说明，所标注的表面结构要求是对完工零件表面的要求。

3）表面结构符号代号的标注方向，应使其注写和读取方向与尺寸的注写和读取方向一致。

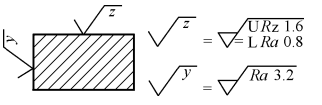
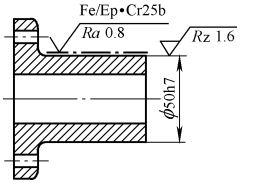
表 2-7-26　表面结构要求在图样上的标注方法

类　型	图　例	方　法
注写方向		使表面结构的注写和读取方向与尺寸的注写和读取方向一致
在轮廓线上标注		表面结构要求可标注在轮廓线上，其符号应从材料外指向并接触表面

（续）

类　型	图　例	方　法
标注在尺寸线上		在不致引起误解时，表面结构要求可以标注在给定的尺寸线上
标注在指引线上		表面结构符号可用黑点的指引线或带箭头的指引线标注
标注在几何公差的框格上		表面结构符号可标注在几何公差框格的上方
标注在圆柱和棱柱表面上		圆柱和棱柱的表面结构要求只标注一次，如果每个棱柱表面有不同的表面结构要求，则应分别单独标注
有相同表面结构要求的简化注法	 a)  b)	如果在工件的多数（包括全部）表面有相同的表面结构要求，则其表面结构要求可统一标注在图样的标题栏附近。此时在表面结构要求的符号后面的括号内给出无任何其他标注的基本符号

（续）

类　型	图　例	方　法
多个表面有共同要求的简化注法		用带字母的完整符号，以等式的形式，在图形或标题栏附近，对有相同表面结构要求的表面进行简化标注
两种或多种工艺获得同一表面的注法		由几种不同的工艺方法获得的同一表面，当需要明确每种工艺方法的表面结构要求时，可用虚线方式分开标注

第四节　读 图 方 法

一、零件图的识读

零件图是设计部门提交给生产部门的重要技术文件，用于表达零件的结构形状、尺寸大小和技术要求的图样。零件图是生产过程中，加工制造和检验测量零件的重要依据。

1. 零件图的内容

一张完整的零件图应包括以下内容：

（1）一组视图　在零件图中须用一组视图将零件各部分的结构形状正确、完整、清晰、合理地表达出来。零件的形状和结构，应根据零件的结构特点选择适当的视图、剖视图、断面图、局部放大图等表示法，用最简明的方案将零件的形状、结构表达出来。

（2）加工制造的全部尺寸　零件图上的尺寸不仅要标注得完整、清晰、正确，而且还要合理，既能够满足设计意图，又适宜于加工制造和检验。

（3）技术要求　零件图上用规定的符号、标记、代号或文字简明的表达出零件在加工制造和检验时应达到的各项技术指标。技术要求包括表面粗糙度、尺寸公差、几何公差、表面处理、热处理、硬度、检验等要求，零件制造后要满足这些要求才能算是合格产品。

（4）标题栏　零件图标题栏的内容一般包括零件名称、材料、数量、比例、图的编号以及设计、描图、绘图、审核人员的签名等。

2. 识读零件图

（1）如何读组合体视图

1）形体分析法。形体分析法是读图的基本方法，把视图中的封闭线框对应起来，

然后想象出各自的形状和位置，综合起来想出整体形状。读图步骤为：

① 抓住形体特征，分出组合形体，如图 2-7-52a 所示。

② 根据投影对应的线框，联系起来，即可想象出该形体的形状，如图 2-7-52b、c、d、e 所示。

③ 通过想象出的形体，利用组合体的组合形式综合来想整体。

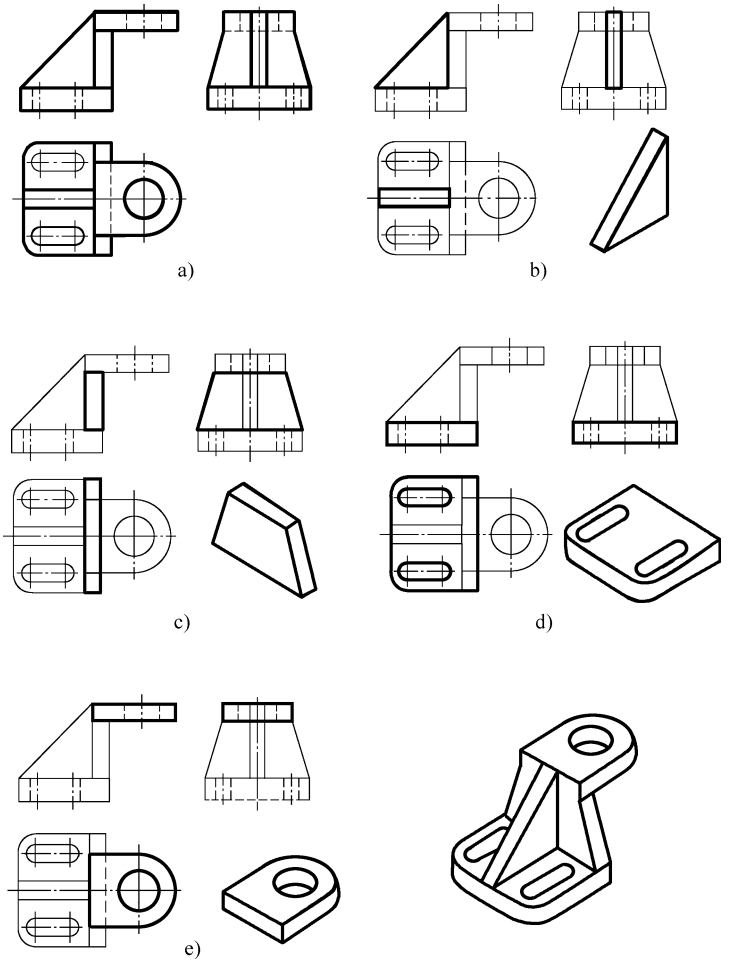


图 2-7-52　形体分析法

2）线面分析法。线面分析法是运用投影的规律，把形体的表面分解为线、面几何要素，通过判断这些要素的空间位置、形状来想象出形体的形状。读图步骤为：

① 根据视图找对应关系，大致确定形体的切割形式。

② 根据线框对应的线条，想象出面的形状，如图 2-7-53b、c、d、e 所示。

③ 将各个特征面组合起来，想象出空间形体。

3）识读组合体的尺寸。组合体尺寸的分类：

① 定形尺寸。确定各基本几何形状大小的尺寸称为定形尺寸。图 2-7-54 中标出的 ϕ20、ϕ40、42、16、20、90、56 都是定形尺寸。

② 定位尺寸。确定组合体中各基本几何体之间相对位置的尺寸称为定位尺寸，包括三个方向的尺寸。图 2-7-54中标出的 64 是圆柱管的高度定位尺寸，其长度、宽度的定位尺寸为 0，不标注。

③ 总体尺寸。确定组合体外形总长、总宽、总高的三个尺寸称为总体尺寸。如图 2-7-54所示，总长是 90，总宽是56，总高是84。总体尺寸常常与定形尺寸和定位尺寸合用，有时是通过计算确定。

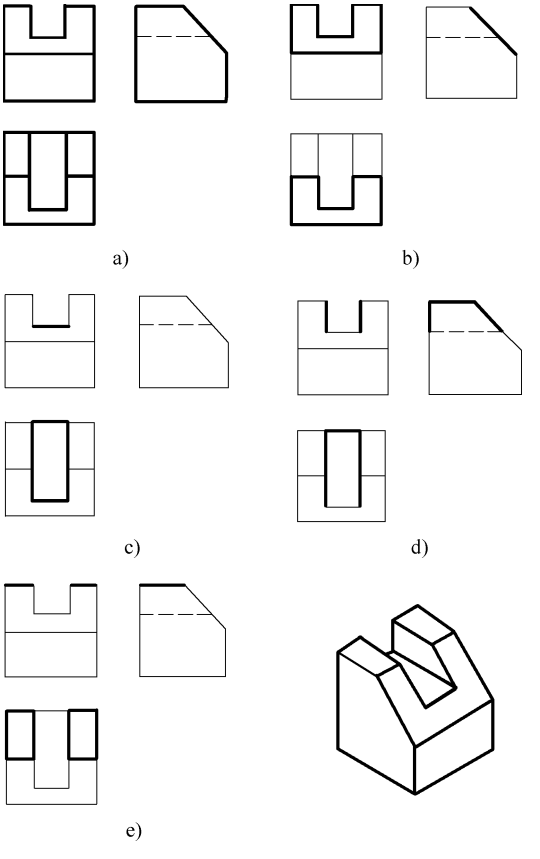


图 2-7-53　线面分析法

（2）读图要求　一张零件图的内容是相当丰富的，不同工作岗位的人看图的目的也不同，通常读零件图的主要要求为：

1）对零件有一个概括的了解，如名称、材料等。

2）根据给出的视图，分析了解组成零件各部分结构的形状、特点以及它们之间的相对位置，想象出零件的形状，进而明确零件在设备或部件中的作用及零件各部分的功能。

3）通过阅读零件图的尺寸，对零件各部分的大小有一个概念，进一步分析出各方向尺寸的主要基准。

4）明确制造零件的主要技术要求，如表面粗糙度、尺寸公差、几何公差、热处理及表面处理等要求，以便确定正确的加工方法。

（3）识读零件图的一般方法和步骤　识读零件图的方法没有一个固定不变的程序，对于较简单的零件图，也许泛泛地阅读就能想象出物体的形状及明确其精度要求。对于较复杂的零件，则需要通过深入分析，由整体到局部，再由局部到整体反复推敲，最后才能搞清其结构和精度要求。一般而言应按下述步骤去阅读一张零件图。

1）看标题栏。标题栏内列出了零件的名称、材料、比例等信息，所以首先从标题栏入手，了解零件的名称、材料及画图比例等一些有关的概括信息，必要时还需要结合装配图或其他设计资料，弄清楚该零件在什么机器或部件上使用。

2）明确视图关系。所谓视图关系，即视图表达方法和各视图之间的投影联系。首

先从主视图入手，了解各视图的名称及相互间的对应关系，采用的表达方法和所表达的内容。并找出剖视、断面图的剖切位置、投影方向等，然后研究各视图的表达重点。

3）分析视图，想象零件的结构形状。看图时，根据零件的功用和视图特征，利用组合体的看图方法，对零件进行形体分析、线面分析。从基本视图看零件的大体的内外形状；结合局部视图、斜视图以及断面图等表达方法，看清零件的局部或斜面的形状。再综合各部分形状，搞清它们之间的相对位置，想象出零件的整体形状。一般按先看整体，后看细节；先看外部结构，后看内部结构；先看主要结构，后看次要结构；先看易懂部分，后看难懂部分的顺序进行分析。还可根据尺寸及功用判断、想象形体。

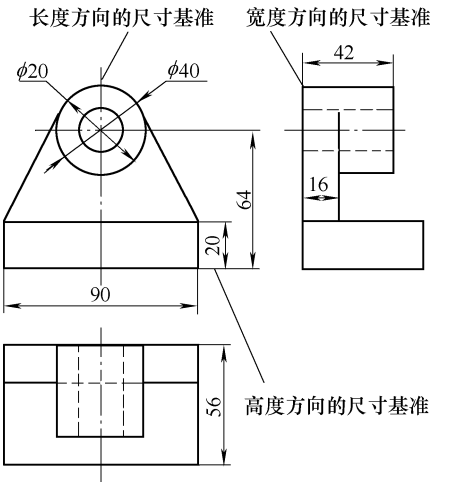


图 2-7-54　组合体的尺寸

4）尺寸分析。根据尺寸标注的原则来分析尺寸，找出长、宽、高三个方向的尺寸基准。同时按形体分析图上标注的各个尺寸，分清零件的主要尺寸和一般尺寸。从图中尺寸公差和几何公差的标注，分析了解零件尺寸和形状位置方面的精度要求。特别要注意精度高的尺寸，并了解其要求和作用。

分析表面粗糙度时，了解零件的哪些表面是加工面，哪些是非加工面，即表面质量要求。要注意它与尺寸精度的关系，还应了解零件制造、加工时的某些特殊要求。

5）分析技术要求。读懂视图中各项技术要求，如表面粗糙度、极限与配合、几何公差及文字说明的加工、制造、检验等内容。

6）综合分析。总结上述内容并进行综合分析，想象出零件的总体形状和技术要求的全貌。还应综合考虑零件的结构和工艺是否合理，表达方案是否恰当，检查有无错看或漏看的地方，以加深对零件图的理解。

二、装配图的识读

1. 装配图的内容

一张完整的装配图应包括下列四项内容。

（1）一组视图　根据装配图的规定画法和表达方法所画出的一组视图，用来表达机器或部件的工作原理、结构形状、装配关系、连接情况及主要零件的结构形状等。

（2）一组尺寸　用来表示机器或部件的规格、性能、装配、检验、总体及安装时所需要的一些尺寸。

（3）技术要求　说明机器或部件的规格性能、装配调整、试验安装、检验维修，以及在包装运输、使用管理中所需要达到的技术要求和注意的事项等。

（4）零件的编号、明细栏　在装配图中应对每种不同的零件编写序号，并依次填

写明细栏。另外，标题栏中应填写部件或机器的名称、规格、比例、图号及设计、制图、校核人员的签名等。

2. 识读零件图的一般方法和步骤

（1）概括了解　主要了解部件的名称、性能、作用、大小，以及装配体中零件的一般情况等。

首先从标题栏入手，了解部件的名称。再结合生产实际经验了解一下它的性能和作用。

从编号中可以了解到共有多少种零件。明细栏中列出了所有零件的名称、数量、材料、规格和标准代号等。还可以了解哪些是标准件，哪些是一般零件。

（2）分析视图及表达方法　首先分析装配图中用了几个视图来表达，确定出主视图及各视图之间的投影关系。即确定每个视图的投影方向、剖切位置、表达方法，分析各视图所表达的主要内容。

（3）工作原理及装配关系　了解机器或部件是怎样工作的，运动和动力是如何传递的。弄清楚各有关零件间的连接方式和装配关系，搞清部件的传动、支承、调整、润滑和密封等情况。

（4）分析零件的结构形状　分析零件的目的是为弄清每个零件的主要结构形状和作用，以及进一步了解各零件间的连接形式和装配关系。

首先从主要零件开始，区分不同零件的投影范围。即根据各视图的对应关系，及同一零件在各个视图上的剖面线方向和间隔都相同的规则，区分出该零件在各个视图上的投影范围，按照相邻零件的作用和装配关系构思其结构。并依次逐个进行分析确定。对于部件装配图中的标准件，可由明细栏中确定其规格、数量和标准代号。如螺柱、螺母、滚动轴承等的有关资料可从相关手册中查到。

（5）分析尺寸和技术要求　分析装配图中所标注的尺寸，对弄清部件的规格、零件间的配合性质、安装连接关系和外形大小有着重要的作用。分析技术要求，了解装配、调试、安装等注意事项。

3. 看装配图的某些注意点

1）相邻两个零件的接触面和配合面之间，规定只画一条线，而非接触面、非配合表面，则不论间隙多小，均应留间隙（为两条线）。

2）相邻两个被剖切的金属零件，它们的剖面线倾斜方向应相反，若几个相邻零件被剖切，其剖面线可用间隙、倾斜方向错开等方法加以区别，但在同一张图样上，表示同一零件的剖面线其方向、间隔应相同。剖面厚度小于2mm时，允许以涂黑来代替剖面线。

3）在装配图上，当剖切平面通过标准件（螺钉、螺栓、螺母、垫圈、销、键等）和实心件（轴、杆、柄、球等）的基本轴线时，这些零件按不剖绘制。

4）对于薄、细、小间隙，以及斜度、锥度很小的零件或某部位，可以适当地加厚、加粗、加大画出，以使这些部位的轮廓特征明晰。

5）简化措施如下：

① 对于同一规格、均匀分布的螺栓、螺母等联接件或相同的零件组，允许只画一个或一组，其余用中心线或轴线表示其位置。

② 对于滚动轴承、密封圈、油封等，可仅画出对称图形的一半，另一半按其外轮廓画出，并在其中画交叉的细实线。

③ 零件上的工艺结构，如倒角、倒圆、沟槽、凸台等可省略不画。

6）为便于看图、管理图样和组织生产，装配图上需对每个不同的零、部件进行编号，序号应按顺时针或逆时针方向整齐地顺次排列。

第八章
数学与力学知识

第一节　函　　数

一、直角坐标系

在同一个平面上互相垂直且有公共原点的两条数轴构成平面直角坐标系，简称为直角坐标系。通常，两条数轴分别置于水平位置与铅直位置，取向右与向上的方向分别为两条数轴的正方向。水平的数轴称为 X 轴或横轴，竖直的数轴称为 Y 轴或纵轴，X 轴或 Y 轴统称为坐标轴，它们的公共原点 O 称为直角坐标系的原点。X 轴和 Y 轴把坐标平面分成四个象限，右上面的称为第一象限，其他三个部分按逆时针方向依次称为第二象限、第三象限和第四象限。象限以数轴为界，横轴、纵轴上的点及原点不属于任何象限。一般情况下，X 轴和 Y 轴取相同的单位。图 2-8-1 所示为直角坐标系。

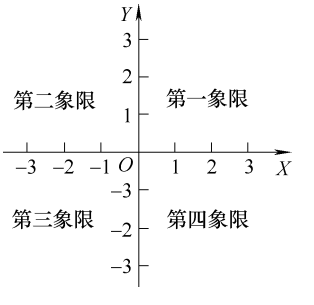


图 2-8-1　直角坐标系

二、点的坐标

1. 点的坐标的概念

有了平面直角坐标系，平面内的每一个点就都可以分别用一个有序数对来表示。若点 A 是平面直角坐标系中的一点，如图 2-8-2 所示，由点 A 向 X 轴作垂直线，垂足 D 在 X 轴上的坐标为 6，由点 A 向 Y 轴作垂线，垂足 B 在 Y 轴上的坐标为 4，则称点 A 的横坐标为 6，纵坐标为 4，所以点 A 的坐标记为（6，4）。

平面内的点坐标是一个有序数对，当 $a \neq b$ 时，（a，b）和（b，a）分别是两个不同点的坐标，其顺序都是横坐标在前，纵坐标在后，中间用“,”分开，横、纵坐标的位置决不能颠倒［例如坐标（−2，1）和（1，−2）分别表示二象限和四象限内的点］。

反过来，若（a，b）是一个有序数对，以这个有序数对作为坐标，可以确定坐标平面内的一点 A。这样，有了平面直角坐标系，就将几何中最基本的元素“点”与代数中最基本

元素“有序数对”建立起一一对应的关系。

2. 点的坐标特征

1）X 轴将坐标平面分为两部分，X 轴上方的点的纵坐标为正数，X 轴下方的点的纵坐标为负数，Y 轴把坐标平面分为两部分，Y 轴左侧的点的横坐标为负数，Y 轴右侧点的横坐标为正数。

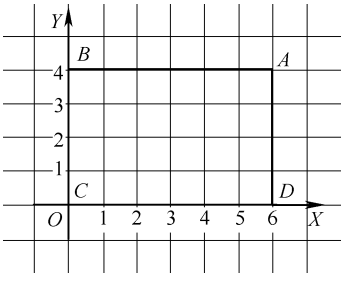


图 2-8-2　点的坐标

2）规定坐标原点的坐标为（0，0）。

3）X 轴上的点可记为（x，0），Y 轴上的点可记为（0，y）。

4）坐标平面内的点 P（x，y）的坐标有如下特征：

点 P 在第一象限时 $x>0$ 且 $y>0$。

点 P 在第二象限时 $x<0$ 且 $y>0$。

点 P 在第三象限时 $x<0$ 且 $y<0$。

点 P 在第四象限时 $x>0$ 且 $y<0$。

5）与 Y 轴垂直的直线上的点的纵坐标相同。

6）与 X 轴垂直的直线上的点的横坐标相同。

7）一、三象限的角平分线上的点的横坐标等于纵坐标。

8）二、四象限的角平分线上的点的横坐标与纵坐标互为相反数。

三、极坐标

在平面内取一定点 O，从 O 点引一条射线 OX，选定一个长度单位和角度的方向（通常取逆时针方向为正方向），就在平面上建立起一个极坐标系（图 2-8-3）。点的极坐标由极径 r 和极角 θ 两个参数表示，即 M（r，θ）。

直角坐标系与极坐标系的互换：

已知极坐标系中的两个坐标 r 和 θ 可以由下面的公式转换为直角坐标系下的坐标值：

$$\begin{cases} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \end{cases}$$

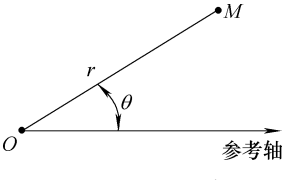


图 2-8-3　极坐标

通过上式，可从直角坐标系中的 x 和 y 两坐标，计算出极坐标下的坐标：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \arctan\frac{y}{x}$$

在 $x=0$ 的情况下：若 y 为正数，$\theta=90°$（$\pi/2$rad）；若 y 为负，则 $\theta=270°$（$3\pi/2$rad）。

四、函数

1. 函数的概念

如果在某变化过程中，有两个变量 x 和 y，并且对于 x 在某一范围内的每一个确定

的值，按照某个对应法则，y 都有唯一确定的值和它对应；那么 y 就是 x 的函数。x 称为自变量。可以记做：$y=f(x)$（其中 f 表示对应法则）。

自变量 x 的取值范围称为函数的定义域，和 x 的值相对应的 y 的值称为函数值，函数值的集合叫做函数的值域。

2. 函数表示方法

解析法：用等式表示两个变量间的函数关系的方法。

列表法：用列表表示两个变量间的函数关系的方法。

图像法：用图像表示两个变量间的函数关系的方法。

3. 函数的性质

（1）函数的单调性　在一个区间上，如果对于自变量 x 的任意两个量 x_1 和 x_2，当 $x_1<x_2$ 时，都有 $f(x_1)<f(x_2)$，那么称函数 $f(x)$ 在此区间上是增函数；在一个区间上，如果对于自变量 x 的任意两个量 x_1 和 x_2，当 $x_1<x_2$ 时，都有 $f(x_1)>f(x_2)$，那么称函数 $f(x)$ 在此区间上是减函数。

如果函数 $y=f(x)$ 在某个区间上是增函数或减函数，就说 $f(x)$ 在此区间上具有单调性，此区间叫做 $f(x)$ 的单调区间。

（2）函数的奇偶性　如果对于函数 $f(x)$ 的定义域内的任意一个 x，都有 $f(-x)=-f(x)$，那么称 $f(x)$ 是奇函数，如果对于函数 $f(x)$ 的定义域内的任意一个 x，都有 $f(-x)=f(x)$，那么称 $f(x)$ 是偶函数。

奇函数图像关于原点对称，偶函数图像关于 Y 轴对称。

（3）反函数的概念　如果对于函数 $y=f(x)$ 值域内的每一个确定的值 y_0，自变量 x，都有一个确定的值 x_0 和 y_0 对应，那么，就可以得到一个以 y 为自变量，以对应的 x 值为函数值的函数，这个函数称为原来函数的反函数，记做 $x=f^{-1}(y)$，习惯上用 x 表示变量，y 表示函数，把函数 $y=f(x)$ 的反函数记做 $y=f^{-1}(x)$。$y=f(x)$ 的定义值域分别是 $y=f^{-1}(x)$ 的值域、定义域。

4. 正比例函数、一次函数、反比例函数

1）函数 $y=kx$（$k\neq0$）称为正比例函数。正比例函数图像如图 2-8-4 所示。

正比例函数 $y=kx$ 的图像是经过点（0，0）和点（1，k）的直线，它具有以下性质：

① 当 $k>0$ 时，它的图像在第一、三象限内，如图 2-8-4a 所示，y 随 x 的增大而增大；当 $k<0$ 时，它的图像在第二、四象限内，如图 2-8-4b 所示，y 随 x 的增大而减小。

② 由于 $|k|$ 的大小不同，直线对于 X 轴的倾斜程度也不同，$|k|$ 越小，直线越靠近 X 轴；$|k|$ 越大，直线越远离 X 轴，如图 2-8-5 所示。

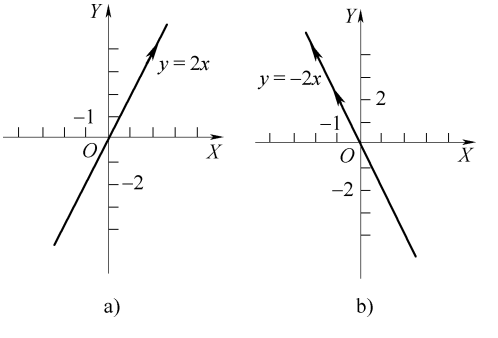


图 2-8-4　正比例函数

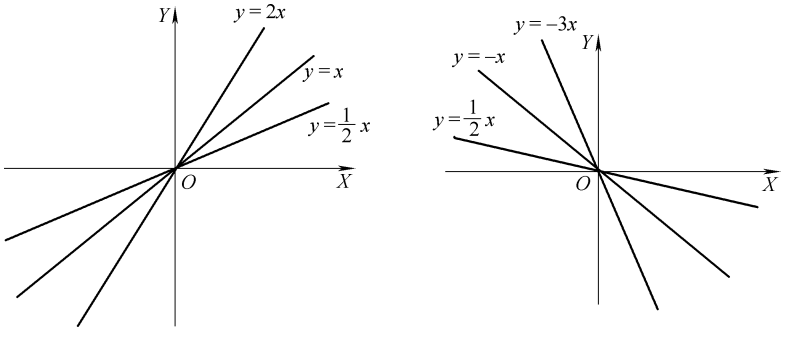


图 2-8-5　系数 k 的影响

2）函数 $y=kx+b$ 称为 x 的一次函数（k，b 是常数且 $k\neq0$）。

一次函数 $y=kx+b$ 的图像是经过点（0，b）而平行于直线 $y=kx$ 的一条直线，如图 2-8-6 所示，它具有以下性质：

① 当 $k>0$ 时，y 随 x 增大而增大，如图 2-8-7a 所示；当 $k<0$ 时，y 随 x 的增大而减小，如图 2-8-7b 所示。

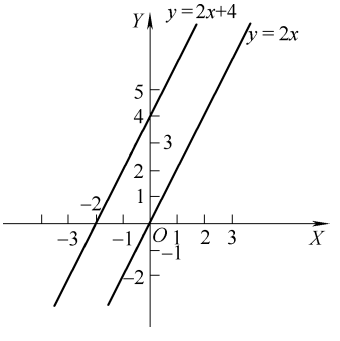


图 2-8-6　一次函数

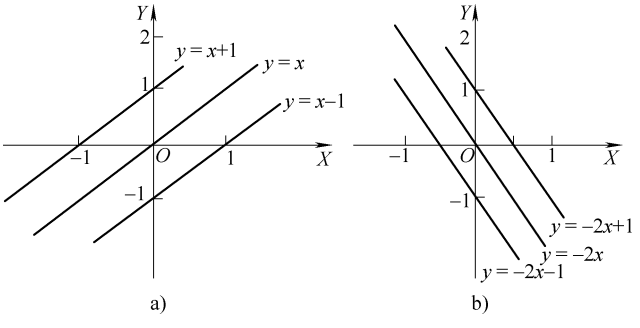


图 2-8-7　一次函数的性质

② $|k|$ 越小，直线越靠近经过点（0，b）的 X 轴的平行线；$|k|$ 越大，直线越离开经过点（0，b）的 X 轴的平行线。

3）函数 $y=\dfrac{y}{x}$ 称为反比例函数。图 2-8-8 所示为反比例函数。

反比例函数 $y=\dfrac{k}{x}(k\neq0)$ 的图像又称为双曲线，它具有以下性质：

① 当 $k>0$ 时，函数图像的两个分支分别分布在第一、三象限内，且每一个分支中 y 随 x 的增大而减小；当 $k<0$ 时，两个分支分别分布在第二、四象限内，且每一个分支中 y 随

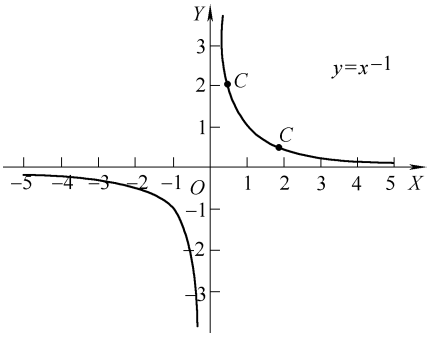


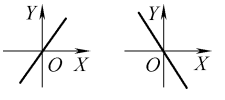
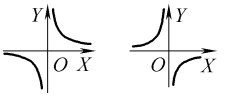
图 2-8-8　反比例函数

x 的增大而增大。

② 两个分支都无限接近但永远不能达到 X 轴和 Y 轴。

4）正比例函数与反比例函数的对比见表 2-8-1。

表 2-8-1　正比例函数与反比例函数的对比

函　　数	正比例函数	反比例函数
解析式	$y=kx$（$k\neq0$）（特殊的一次函数）	$y=\frac{k}{x}$ 或 $y=kx^{-1}$（$k\neq0$）
图像		
自变量取值范围	全体实数	$x\neq0$ 的一切实数
图像的位置	当 $k>0$ 时，在一、三象限 当 $k<0$ 时，在二、四象限	当 $k>0$ 时，在一、三象限 当 $k<0$ 时，在二、四象限
性质	当 $k>0$ 时，y 随 x 的增大而增大 当 $k<0$ 时，y 随 x 的增大而减小	当 $k>0$ 时，y 随 x 的增大而减小 当 $k<0$ 时，y 随 x 的增大而增大

5. 二次函数

函数 $y=ax^2+bx+c$（其中 a、b、c 是常数且 $a\neq0$）称为二次函数。

（1）函数 $y=ax^2$ 的图像和性质　函数 $y=ax^2$ 的图像如物体抛射时所经过的路线，所以又称抛物线，如图 2-8-9 所示。它关于 Y 轴对称，Y 轴称为抛物线的对称轴，对称轴和抛物线的交点叫做抛物线的顶点，这个顶点就是原点。

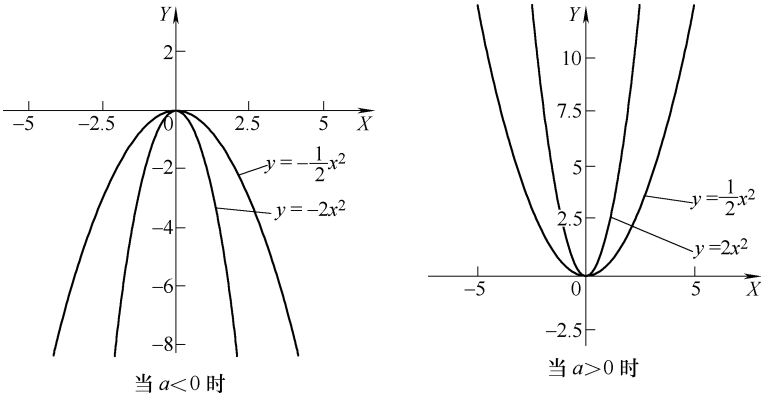


图 2-8-9　抛物线

函数 $y=x^2$ 性质如下：

1）函数 $y=x^2$ 的顶点在原点，以 Y 轴为对称轴。

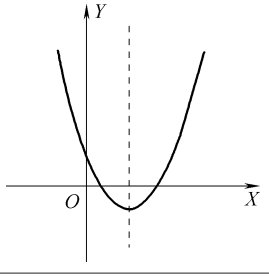
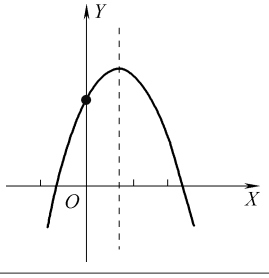
2）当 $a>0$ 时，抛物线 $y=ax^2$ 在 X 轴的上方（顶点在 X 轴上），它的开口向上并向上无限伸展；当 $a<0$ 时，抛物线 $y=ax^2$ 在 X 轴的下方（顶点在 X 轴上），它的开口向下并向下无限伸展。

3）当 $a>0$ 时，在对称轴的左侧，y 随着 x 的增大而减小；在对称轴的右侧，y 随着 x 的增大而增大；函数 y 在顶点处的值最小。当 $a<0$ 时，在对称轴的左侧，y 随着 x 的增大而增大；在对称轴的右侧，y 随着 x 的增大而减小；函数 y 在顶点处的值最大。

4）$|a|$越大，抛物线的开口越小；$|a|$越小，抛物线的开口越大。

（2）函数 $y=ax^2+bx+c$ 的图像和性质　一般的函数 $y=ax^2+bx+c$ 的图像和性质见表 2-8-2。

表 2-8-2　二次函数的图像和性质

对比项	$a>0$	$a<0$
图像		
开口方向	开口向上	开口向下
顶点坐标	$\left(-\frac{b}{2a},\ \frac{4ac-b^2}{4a}\right)$	
对称性	关于直线 $x=-\frac{b}{2a}$ 对称	
单调性	当 $x<-\frac{b}{2a}$ 时，是减函数 当 $x>-\frac{b}{2a}$ 时，是减函数	当 $x<-\frac{b}{2a}$ 时，是增函数 当 $x>-\frac{b}{2a}$ 时，是减函数
最大值与最小值	$y_{\text{最小值}}=\frac{4ac-b^2}{4a}$	$y_{\text{最大值}}=\frac{4ac-b^2}{4a}$

第二节　三 角 函 数

一、角的概念

1. 任意角

角可以看做是一条射线绕它的端点在平面内旋转而成，射线的端点称为角的顶点，旋转开始时的射线称为角的始边，终止时的射线称为角的终边。

角的形成带有方向性，按逆时针方向旋转形成的角称为正角。按顺时针方向旋转形成的角称为负角。当射线没有任何旋转时所形成的称为零角。

2. 象限角

角的顶点与原点重合，角的始边与 X 轴的非负半轴重合，终边落在哪个象限内，这个角就称为哪个象限的角。

α 为第Ⅰ象限角：$2k\pi < \alpha < 2k\pi + \frac{\pi}{2}$ $(k \in Z)$

α 为第Ⅱ象限角：$2k\pi + \frac{\pi}{2} < \alpha < (2k+1)\pi (k \in Z)$

α 为第Ⅲ象限角：$(2k+1)\pi < \alpha < (2k+1)\pi + \frac{\pi}{2} (k \in Z)$

α 为第Ⅳ象限角：$(2k+1)\pi + \frac{\pi}{2} < \alpha < 2(k+1)\pi (k \in Z)$

3. 角的度量

1）角度制：周角的 1/360 称为 1°的角，用度作量角单位。

2）弧度制：等于半径长的圆弧所对圆心角称为 1 弧度的角，用弧度作量角单位。

3）角度与弧度之间的换算关系：

$$360° = 2\pi \text{rad}$$

$$180° = \pi \text{rad}$$

$$1° = \frac{\pi}{180}\text{rad} \approx 0.017453\text{rad}$$

$$1\text{rad} = \left(\frac{180}{\pi}\right)° \approx 57.30° = 57°18'$$

4）常用特殊的角度与弧度之间的对应关系见表 2-8-3。

表 2-8-3　特殊角的角度与弧度换算

度	0°	30°	45°	60°	90°	180°	270°	360°
弧度	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π

二、任意角的三角函数

1. 定义

设 a 是一个任意大小的角，角 a 终边上任意一点 P（除端点外）的坐标是（x，y），它与原点的距离是 r（$r>0$），如图 2-8-10 所示。那么角 a 的六个三角函数定义如下：

正弦函数 $\sin a = \frac{y}{r}$，余弦函数 $\cos a = \frac{x}{r}$。

正切函数 $\tan a = \frac{y}{x}$，余切函数 $\cot a = \frac{x}{y}$。

正割函数 $\sec a = \frac{r}{x}$，余割函数 $\csc a = \frac{r}{y}$。

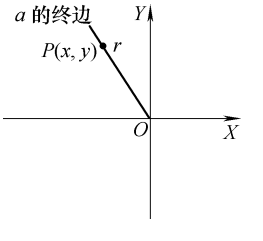


图 2-8-10　任意角的三角函数

2. 任意角的三角函数的符号

任意角的三角函数的正负值是由 x、y 在坐标系内的位置决定的。其正负如图 2-8-11所示。

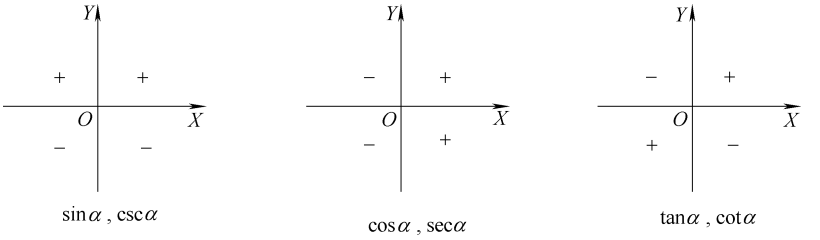


图 2-8-11　任意角的三角函数的符号

三、三角函数的图像和性质

1. 正弦函数、余弦函数、正切函数的图像

1）正弦函数 $y=\sin x$ 的图像如图 2-8-12 所示。

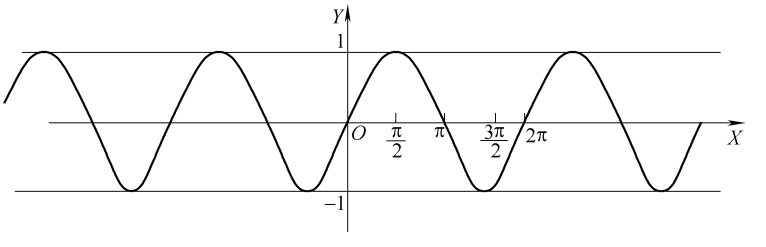


图 2-8-12　正弦函数 $y=\sin x$

2）余弦函数 $y=\cos x$ 的图像如图 2-8-13 所示。

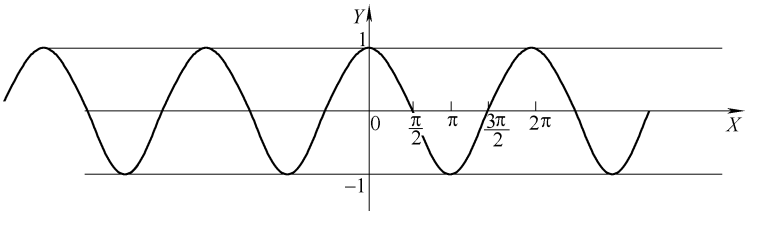


图 2-8-13　余弦函数 $y=\cos x$

3）正切函数 $y=\tan x$ 的图像如图 2-8-14 所示。

2. 正弦函数、余弦函数、正切函数的性质（表 2-8-4）

四、解三角形

1. 直角三角形

直角三角形△ABC 的三条边和三个角如图 2-8-15 所示。除角 C 外的其余五个元素的关系如下：

表 2-8-4　正弦、余弦、正切函数的性质

函数 / 性质	$y=\sin x$	$y=\cos x$	$y=\tan x$
定义域	**R**	**R**	$\left\{x \mid x\in\mathbf{R}\text{ 且 }x\neq k\pi+\frac{1}{2}\pi,\ k\in\mathbf{Z}\right\}$
值域	$[-1,\ +1]$	$[-1,\ +1]$	**R**
周期性	2π	2π	π
奇偶性	奇函数	偶函数	奇函数
单调性	$\left[-\frac{\pi}{2}+2k\pi,\ \frac{\pi}{2}+2k\pi\right]$ 上为增函数；$\left[\frac{\pi}{2}+2k\pi,\ \frac{3\pi}{2}+2k\pi\right]$ 上为减函数（$k\in\mathbf{Z}$）	$[(2k-1)\pi,\ 2k\pi]$ 上为增函数；$[2k\pi,\ (2k+1)\pi]$ 上为减函数（$k\in\mathbf{Z}$）	$\left(-\frac{\pi}{2}+k\pi,\ \frac{\pi}{2}+k\pi\right)$ 上为增函数（$k\in\mathbf{Z}$）

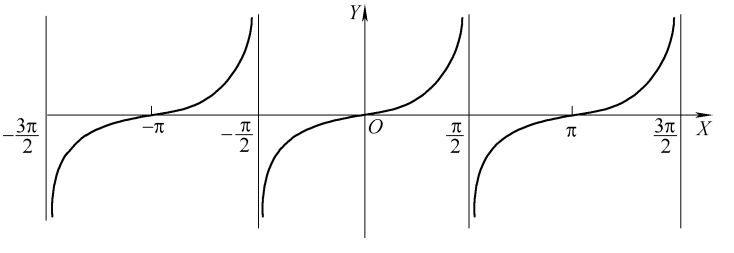


图 2-8-14　正切函数 $y=\tan x$

三边之间的关系：$a^2+b^2=c^2$（勾股定理）。

两锐角间的关系：$A+B=90°$。

边与角的关系：

$$\sin A=\frac{A\text{ 的对边}}{\text{斜边}}=\frac{a}{c},\quad \cos A=\frac{A\text{ 的邻边}}{\text{斜边}}=\frac{b}{c}$$

$$\tan A=\frac{A\text{ 的对边}}{A\text{ 的邻边}}=\frac{a}{b},\quad \cot A=\frac{A\text{ 的邻边}}{A\text{ 的对边}}=\frac{b}{a}$$

根据这些关系，在知道直角三角形两个元素（至少有一个边）的情况下，可以求出其余三个未知元素，这个求未知元素的过程称为解直角三角形。

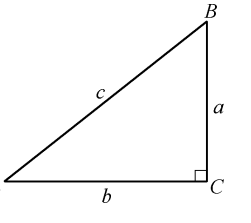


图 2-8-15　直角三角形

2. 解斜三角形

由斜三角形中的三个元素（至少有一个是边）求其余三个未知元素（可能有两解、一解或无解）的过程，称为解斜三角，见表 2-8-5。

表 2-8-5　解三角形的方法

解斜三角的方法	适 用 类 型	备　　注
余弦定理 $a^2=b^2+c^2-2bc\cos A$ $b^2=c^2+a^2-2ca\cos B$ $c^2=a^2+b^2-2ab\cos C$	1）已知三边 2）已知两边及其夹角	类型 1）、2）在有解时只有一解，这也可由全等三角形的判断定理得出
正弦定理 $\frac{a}{\sin A}=\frac{b}{\sin B}=\frac{c}{\sin C}$	3）已知两角与一边 4）已知两边及其中一边的对角	类型 3）在有解时只有一解，类型 4）可有两解、一解或无解

五、常用的特殊三角函数值（表 2-8-6）

表 2-8-6　特殊三角函数的值

三角函数值 \ 角	0°	30°	45°	60°	90°
$\sin\alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
$\cos\alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\tan\alpha$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	不存在
$\cot\alpha$	不存在	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	0

第三节　平面解析几何

一、直线

1. 直线的斜率角和斜率

1）在平面直角坐标系中，对于一条与 X 轴相交的直线，把 X 轴绕着交点按逆时针方向旋转到和直线重合时，所转的最小正角称为直线的倾斜角。

当直线与 X 轴平行或重合时，规定它的倾斜角为 0°。

直线的倾斜角 a 的取值范围 $0°\leqslant a<180°$。

2）一条直线的倾斜角 a 的正切称为这条直线的斜率。斜率常用 k 来表示，即 $k=\tan a$。当 a 为锐角时，$k>0$；当 a 为钝角时，$k<0$；当 $a=90°$ 时，k 值不存在；当 $a=0°$ 时 $k=0$。

如果 P_1（x_1，y_1），P_2（x_2，y_2）是直线上任意两点，那么这条直线的斜率为

$$k=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}(x_2\neq x_1)$$

当 $x_2=x_1$ 时，直线平行于 Y 轴或与 Y 轴重合，倾斜角 $a=90°$，斜率不存在。

当 $y_2=y_1$ 时，直线平行于 X 轴或与 X 轴重合，倾斜角 $a=0°$，斜率 $k=0$。

2. 直线方程的各种形式（表 2-8-7）

表 2-8-7　直线方程的类型

名　称	已知条件	方　程	说　明
斜截式	斜率 k 和在 Y 轴的截距 b	$y=kx+b$	不包括 Y 轴和平行于 Y 轴的直线
点斜式	点 $P_1(x_1, y_1)$ 和斜率 k	$y-y_1=k(x-x_1)$	不包括 Y 轴和平行于 Y 轴的直线
两点式	点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$	$\frac{y-y_1}{y_2-y_1}=\frac{x-x_1}{x_2-x_1}$	不包括坐标轴和平行于坐标轴的直线
截距式	在 X 轴上的截距是 a，在轴 Y 上的截距是 b	$\frac{x}{a}+\frac{y}{b}=1$	不包括经过原点的直线以及平行于坐标轴的直线
一般式	—	$Ax+By+C=0$	A、B 不同时为零

3. 几种特殊直线的方程

平行于 X 轴的直线方程：　$y=b(b\neq0)$

X 轴：　$y=0$

平行于 Y 轴的直线方程：　$x=a(a\neq0)$

Y 轴：　$x=0$

经过原点（不包括 Y 轴）的直线：　$y=kx$

4. 两条直线的位置关系

已知两条直线的斜截式方程分别为

$$l_1: y=k_1x+b_1$$

$$l_2: y=k_2x+b_2$$

1）两条直线平行的充分条件是

$$k_1=k_2 \text{ 且 } b_1\neq b_2$$

2）两条直线垂直的充分条件是

$$k_1k_2=-1 \text{ 或 } A_1A_2+B_1B_2=0$$

3）两条直线相交点的坐标

已知两条直线的方程分别为

$$l_1 \quad A_1x+B_1y+C_1=0$$

$$l_2 \quad A_2x+B_2y+C_2=0$$

解方程组

$$\begin{cases}A_1x+B_1y+C_1=0\\A_2x+B_2y+C_2=0\end{cases}$$

如果方程组有唯一解，这个解是两条直线交点坐标；无解，即两条直线平行。

5. 点到直线的距离

点到直线的垂线段的长度，称为点到直线的距离。设点 $P(x_0, y_0)$ 到直线 $Ax + By + C_1 = 0$ 的距离为 d，则

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

6. 两条直线所成的角

两条直线相交构成的不大于直角的角，称为两条直线所成的角，简称夹角。

已知两条直线的方程为 l_1：$y = k_1x + b_1$；l_2：$y = k_2x + b_2$，它们的夹角为 θ。

如果 $1 + k_1k_2 = 0$，则 $\theta = \frac{\pi}{2}$

如果 $1 + k_1k_2 \neq 0$，则 $\tan\theta = \left|\frac{k_2 - k_1}{1 + k_2k_1}\right| \quad \left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$

如果已知两条直线的方程为 l_1：$A_1\mathrm{x} + B_1\mathrm{y} + C_1 = 0$；$l_2$：$A_2\mathrm{x} + B_2\mathrm{y} + C_2 = 0$，它们的夹角为 θ，则

$$\tan\theta = \left|\frac{A_1B_2 - A_2B_1}{A_1A_2 + B_1B_2}\right| \left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$$

二、曲线和方程

1. 定义

在直角坐标系中，如果某曲线 C 上的点与一个二元方程 $f(x, y) = 0$ 的实数解建立了如下关系：

1）曲线上的点的坐标都是这个方程的解。

2）以这个方程的解为坐标的点都是曲线上的点，那么这个方程称为曲线的方程；这条曲线称为方程的曲线。

2. 由方程讨论曲线的性质与图像

由方程画出曲线的基本方法是描点法。可以借助于曲线的方程对曲线的性质进行讨论。

1）曲线的范围。把方程 $f(x, y) = 0$ 变形成 $y = \varphi(x)$ 和 $x = \varphi(y)$ 的形式找出 x，y 的取值范围。

2）曲线的对称性。

如果用 $-y$ 代替方程中 $f(x, y) = 0$ 中的 y，方程 $f(x, y) = 0$ 不变，则曲线关于 X 轴对称。

如果用 $-x$ 代替方程 $f(x, y) = 0$ 中的 x，方程 $f(x, y) = 0$ 不变，则曲线关于 Y 轴对称。

如果用 $-x$，$-y$ 分别代替方程 $f(x, y) = 0$ 中的 x、y，方程 $f(x, y) = 0$ 不变，则曲线关于原点对称。

3）曲线与坐标轴的交点。

在方程$f(x, y)=0$中，令$y=0$，可以求出曲线与X轴的交点。

在方程$f(x, y)=0$中，令$x=0$，可以求出曲线与Y轴的交点。

3. 曲线的交点

由曲线方程定义可知，曲线上的点的坐标都满足方程；反过来，坐标满足方程的点都在曲线上，如果两条曲线有公共点，那么交点的坐标是两个曲线方程的公共实数解，也就是这两个曲线方程所组成的方程组的实数解，方程组有几个实数解，曲线就有几个交点，没有实数解，曲线就不相交。

三、圆

1. 定义

在平面内到定点距离等于定长的点的轨迹是圆。定点是圆心，定长是圆的半径。

2. 圆的标准方程

圆心在原点，半径为r的圆的方程为　$x^2+y^2=r^2$

圆心在$C(a, b)$点，半径为r的圆的方程为$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2$

3. 圆的切线方程

经过圆$x^2+y^2=r^2$上一点$P(x_0, y_0)$的切线方程为$x_0x+y_0y=r^2$

4. 圆的参数方程

圆心在原点，则$\begin{cases}x=r\cos\theta\\y=r\sin\theta\end{cases}$

圆心在$C(\mathrm{a}, \mathrm{b})$点，则$\begin{cases}x=a+r\cos\theta\\y=b+r\sin\theta\end{cases}$

四、椭圆

1. 定义

平面内到两个定点的距离之和等于常数的点的轨迹是椭圆，定点是焦点，两焦点的距离是焦距。

2. 椭圆的标准方程和性质（表2-8-8）

3. 椭圆的参数方程

参数方程为$\begin{cases}x=a\cos\theta\\y=b\sin\theta\end{cases}$

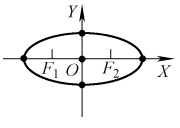
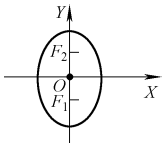
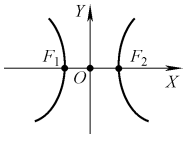
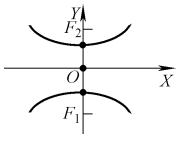
五、双曲线

1. 定义

平面内到两个定点的距离的差的绝对值等于常数的点的轨迹是双曲线，定点是焦点，两焦点的距离是焦距。

2. 双曲线的标准方程及性质（表2-8-8）

表2-8-8　椭圆和双曲线的标准方程及性质

曲线 / 对比项	椭圆		双曲线	
方程	$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$ $(a>b>0)$	$\frac{y^2}{a^2}+\frac{x^2}{b^2}=1$ $(a>b>0)$	$\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=1$ $(a>0,\ b>0)$	$\frac{y^2}{a^2}-\frac{x^2}{b^2}=1$ $(a>0,\ b>0)$
图形				
顶点坐标	$(\pm a,\ 0)$ $(0,\ \pm b)$	$(0,\ \pm a)$ $(\pm b,\ 0)$	$(\pm a,\ 0)$	$(0,\ \pm a)$
对称轴	$x=0,\ y=0$			
焦点坐标	$(\pm c,\ 0)$	$(0,\ \pm c)$	$(\pm c,\ 0)$	$(0,\ \pm c)$
对称中心	$(0,\ 0)$			
离心率	$e=\frac{c}{a}$ 且 $0<e<1$		$e=\frac{c}{a}$ 且 $e>1$	
渐近线方程			$y=\pm\frac{b}{a}x$	$y=\pm\frac{a}{b}x$

3. 等轴双曲线

实轴与虚轴相等的双曲线称为等轴双曲线，它的标准方程是

$$x^2-y^2=a^2 \text{ 或 } y^2-x^2=a^2$$

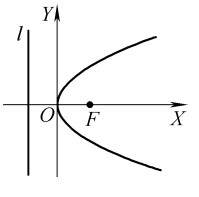
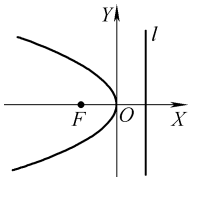
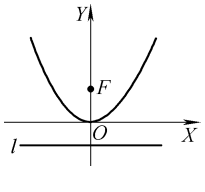
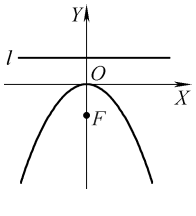
六、抛物线

1. 定义

平面内到定点的距离相等的点的轨迹是抛物线，定点是焦点，定直线是准线。

2. 抛物线的标准方程和性质（表2-8-9）

表2-8-9　抛物线的标准方程和性质

方程 / 对比项	$y^2=2px$ $(p>0)$	$y^2=-2px$ $(p>0)$	$x^2=2py$ $(p>0)$	$x^2=-2py$ $(p>0)$
图形				

（续）

方程 / 对比项	$y^2=2px$ $(p>0)$	$y^2=-2px$ $(p>0)$	$x^2=2py$ $(p>0)$	$x^2=-2py$ $(p>0)$
焦点	$F\left(\frac{p}{2},0\right)$	$F\left(-\frac{p}{2},0\right)$	$F\left(0,\frac{p}{2}\right)$	$F\left(0,-\frac{p}{2}\right)$
准线	$x=-\frac{p}{2}$	$x=\frac{p}{2}$	$y=-\frac{p}{2}$	$y=\frac{p}{2}$
范围	$x\geqslant 0$，$y\in\mathbf{R}$	$x\leqslant 0$，$y\in\mathbf{R}$	$x\in\mathbf{R}$，$y\geqslant 0$	$x\in\mathbf{R}$，$y\leqslant 0$
对称轴	X 轴		Y 轴	
顶点	（0，0）			
离心率	$e=1$			
焦半径	$\lvert PF\rvert=\frac{p}{2}+x_1$	$\lvert PF\rvert=\frac{p}{2}+\lvert x_1\rvert$	$\lvert PF\rvert=\frac{p}{2}+y_1$	$\lvert PF\rvert=\frac{p}{2}+\lvert y_1\rvert$

七、参数方程

在给定的平面坐标系中，如果曲线上任意一点的坐标（x，y）都是某个变数

$$\begin{cases}x=f(t)\\y=\varphi(t)\end{cases}$$

且对于 t 的每一个允许值，由上述方程组所确定的点 $m(x,y)$ 都在这个曲线上，那么该方程组称为这条曲线的参数方程，联系 x 和 y 之间关系的变数称为参变数，简称参数。

类似地，也有曲线的极坐标参数方程：$\begin{cases}\rho=f(t)\\\theta=g(t)\end{cases}$

圆的参数方程：$\begin{cases}x=a+r\cos\theta\\y=b+r\sin\theta\end{cases}$　$(0\leqslant\theta<2\pi)$，（a，b）为圆心坐标，r 为半径。

椭圆的参数方程：$\begin{cases}x=a\cos\theta\\y=b\sin\theta\end{cases}$　$(0\leqslant\theta<2\pi)$，a 为长半轴，b 为短半轴。

直线的参数方程：$\begin{cases}x=x_0+t\cos a\\y=y_0+t\sin a\end{cases}$　x_0、y_0 和 a 表示直线经过点（x_0，y_0），倾斜角为 a。参数为 t。

圆的渐开线的参数方程：$\begin{cases}x=r(\cos\varphi+\varphi\sin\varphi)\\y=r(\sin\varphi+\varphi\cos\varphi)\end{cases}$　$(0\leqslant\varphi<2\pi)$，r 为基元半径，φ 为参数。

摆线的参数方程：$\begin{cases}x=r(\theta-\sin\theta)\\y=r(1-\cos\theta)\end{cases}$，$r$ 为圆半径，θ 是圆的半径所经过的角度（滚动角），当 θ 由 0 变到 2π 时，动点画出了摆线的一支，称为一拱。

抛物线的参数方程：$\begin{cases} x = 2pt^2 \\ y = 2pt \end{cases}$，$p$ 表示焦点到准线的距离，t 为参数。

双曲线的参数方程：$\begin{cases} x = a\sec\theta \\ y = b\tan\theta \end{cases}$，$a$ 为实半轴长，b 为虚半轴长，θ 为参数。

八、零件几何元素的基点坐标的计算

任何一个零件的轮廓都是由不同的几何元素组成，如直线、圆弧以及特形曲线等。各个几何元素间的连接点称为基点，如直线与直线的交点，直线与圆弧的交点或切点，圆弧与圆弧的交点或切点等。

1. 基点的计算例一

如图 2-8-16 所示，A、B、C 和 D 即为基点。基点的坐标是编程中需要的主要数据。

依据零件图样上给定的尺寸，运用代数、三角、几何或解析几何的有关知识，基点的坐标值是比较容易求得的。

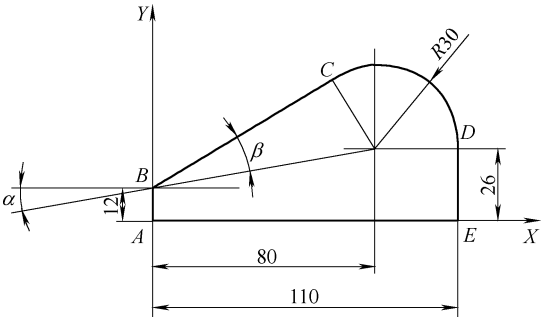


图 2-8-16　基点计算例图一

例如图中零件的基点 A、B、D 和 E 的坐标值，从图样给出的尺寸可以很容易找出，如 A（0，0）、B（0，12）和 D（110，26）。但 C 点是过 B 点的直线与圆心为 O、半径为 30 的圆弧的切点，图样上并未给出该点坐标值，因此要用解联立方程的方法，才能求出切点 C 的坐标值。

求 C 点的坐标值可用多种方法。常用方法是求出直线 BC 的方程，然后与以 O 为圆心，半径为 30 的圆的方程联立求解。为了方便计算，可先将坐标原点选在 B 点上，即暂令 B（0，0）。

由图 2-8-16 可知，以 O 为圆心，半径为 30 的圆的方程为

$$(x-80)^2+(y-14)^2=30^2$$

式中的 O 的坐标为（80，14），可从图中尺寸简单计算而得。

过 B 点的直线方程为 $y=kx$。直线 BC 的方程也如此。从图上可见，此时 $k=\tan(\alpha+\beta)$。为求 k 值，应先求出 α 及 β 值。又由图可知

$$\tan\alpha=\frac{26-12}{80}=0.175, BO=\sqrt{14^2+80^2}=81.215, CO=30$$

于是 $\sin\beta=\dfrac{CO}{BO}=\dfrac{30}{81.215}=0.3694$

这样，就可分别求出 α 和 β，进而求出

$$\tan(\alpha+\beta)=0.6153$$

即 $k=0.6153$，然后将两方程联立

$$\begin{cases}(x-80)^2+(y-14)^2=900\\ y=0.6153x\end{cases}$$

由方程求得

$$\begin{cases}x=64.2786\\ y=39.5507\end{cases}$$

最后，换成以 A 为原点的坐标系，则得 C（64.2786，51.5507）

2. 基点的计算例二

如图 2-8-17 所示的平面凸轮轮廓，由一段 $R50$ 的圆弧（FGE），两段 $R20$ 的圆弧（FA，DE），一段 $R30$（BHC）圆弧和两段直线（AB，CD）构成。

图中零件的基点为 A、B、C、D、E 和 F，以工件圆心 O 为原点得出 F（0，50）、E（0，-50），由于 A、B 两点与 C、D 两点关于 X 轴对称，故只要求出 A、B 两个基点即可。

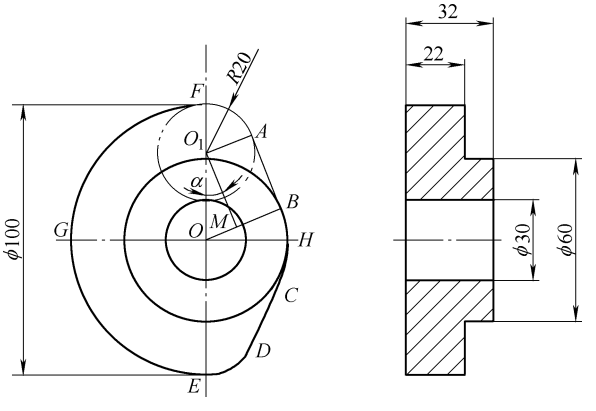


图 2-8-17　基点计算例图二

A 点是以 O_1 为圆心，半径为 20 的圆弧与 AB 直线相切的切点，图样上并未给出该点坐标值，因此要用解联立方程的方法求出切点的坐标值。由图可知

$$\tan\alpha=\frac{OM}{MO_1}=\frac{30-20}{\sqrt{30^2-10^2}}=\frac{1}{\sqrt{8}}\approx\frac{\sqrt{2}}{4}$$

$$\alpha=19.47122°$$

因为 $O_1M\perp OB$，故 $\alpha=\angle BOH$，直线 OB 为 $y=x\tan\alpha=\dfrac{\sqrt{2}}{4}x$。直线 OB 与圆心为 O、半径为 30 的圆相交，则两方程联立为

$$\begin{cases}y=\dfrac{\sqrt{2}}{4}x\\ x^2+y^2=30^2\end{cases}$$

求得 $\begin{cases}x=28.284\\ y=10\end{cases}$，即 B（28.284，10）。

同理，$O_1M\perp OA$ 且 $O_1M/\!/OB$，故直线 OB 为 $y=x\tan\alpha=\dfrac{\sqrt{2}}{4}x+30$，与圆心为 O_1（0，30）、半径为 20 的圆相交。则两方程联立为

$$\begin{cases}y=\dfrac{\sqrt{2}}{4}x+30\\ x^2+(y+30)^2=20^2\end{cases}$$

求得$\begin{cases}x=18.856\\y=36.667\end{cases}$，即 A（18.856，36.667）。

因 A 与 D，B 与 C 是 X 轴对称，所以 D（18.856，－36.667），C（28.284，－10）。

第四节　平 面 向 量

一、向量的概念

1. 有向线段

规定了起点 A 和终点 B，并在终点处标上箭头的线段称为有向线段，记作 $\overline{AB}$。有向线段包含三个要素：起点、方向和长度，知道了有向线段的起点，它的终点就由它的方向和长度唯一确定，如图 2-8-18 所示。

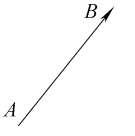


图 2-8-18　有向线段

2. 向量

向量（又称矢量）是具有大小和方向的量，向量可以用有向线段表示。有向线段的长度表示向量的大小，有向线段的方向表示向量的方向，同向且等长的有向线段表示同一向量或相等的向量，用有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 表示向量。另外还常用小写字母表示向量 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$ 等。

3. 向量的长度

有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 表示向量 $\boldsymbol{a}$，$\overrightarrow{AB}$ 的长度也称为向量 $\boldsymbol{a}$ 的长度，记为 $|\overrightarrow{AB}|$ 或 $\boldsymbol{a}$。

4. 零向量和单位向量

长度为零的向量称为零向量。长度为 1 的向量称为单位向量。与向量 $\boldsymbol{a}$ 同方向的单位向量称为 $\boldsymbol{a}$ 的单位向量。

5. 相反相量

与 $\boldsymbol{a}$ 大小相等方向相反的向量，称为 $\boldsymbol{a}$ 的相反相量，记作 $-\boldsymbol{a}$。

6. 平行向量

如果表示若干向量的有向线段所在的直线相互平行或重合，则称这些向量平行或共线。

二、向量的加、减运算和数乘运算

1. 向量的加法

若 $\overrightarrow{AB}=\boldsymbol{a}$，$\overrightarrow{BC}=\boldsymbol{b}$，则 $\overrightarrow{AC}=\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}$；其几何意义如图 2-8-19 所示。

2. 向量的减法

若 $\overrightarrow{OA}=\boldsymbol{a}$，$\overrightarrow{OB}=\boldsymbol{b}$，则 $\overrightarrow{BA}=\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}$；其几何意义如图 2-8-20 所示。

应注意以下两点：

1）若 $\boldsymbol{a}=(x_1,\ y_1)$，$\boldsymbol{b}=(x_2,\ y_2)$，则 $a-b=(x_1-x_2,\ y_1-y_2)$。

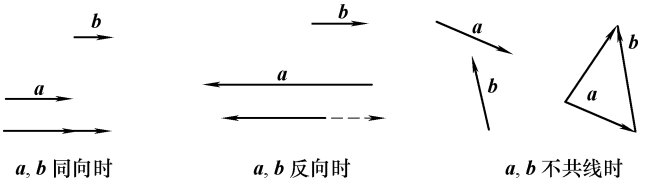


图 2-8-19　向量的加法

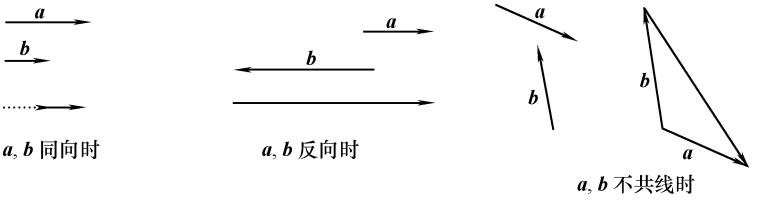


图 2-8-20　向量的减法

2）$\overrightarrow{OA}=-\overrightarrow{AO}$，$\boldsymbol{a}=-(-\boldsymbol{a})$。

3. 向量加减法的运算律

1）交换率：$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a}$。

2）结合律：$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}=(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b})+\boldsymbol{c}=\boldsymbol{a}+(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c})$

$\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}-\boldsymbol{c}=(\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b})-\boldsymbol{c}=\boldsymbol{a}-(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c})$

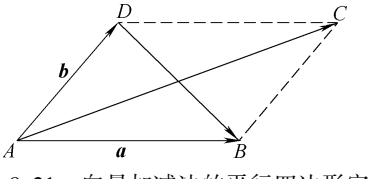


图 2-8-21　向量加减法的平行四边形定则

4. 向量加减法的平行四边形法则

若$\overrightarrow{AB}=\boldsymbol{a}$，$\overrightarrow{AD}=\boldsymbol{b}$，则$\overrightarrow{AC}=\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}$，$\overrightarrow{DB}=\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}$。其几何意义如图 2-8-21 所示。

第五节　力的合成与分解

一、标量和矢量

将物理量区分为矢量和标量体现了用分类方法研究物理问题的思想。

矢量满足平行四边形定则（力、位移、速度、加速度、动量、冲量、电场强度、磁感应强度），标量不满足平形四边形定则（路程、时间、质量、体积、密度、功和功率、电势、能量、磁通量、振幅）。

1）矢量和标量的根本区别在于它们遵从不同的运算法则，标量用代数法，矢量用平行四边形定则或三角形定则。

矢量的合成与分解都遵从平行四边形定则（可简化成三角形定则）。平行四边形定则实质上是一种等效替换的方法。一个矢量（合矢量）的作用效果和另外几个矢量（分矢量）共同作用的效果相同，就可以用这一个矢量代替那几个矢量，也可以用那几

个矢量代替这一个矢量，而不改变原来的作用效果。

2）同一直线上矢量的合成可转为代数法，即规定某一方向为正方向。与正方向相同的物理量用正号代入，相反的用负号代入，然后求代数和，最后结果的正、负体现了方向。但有些物理量虽也有正负之分，运算法则也一样，但不能认为是矢量，最后结果的正负也不表示方向，如：功、重力势能、电势能和电势等。

二、力的合成与分解

力的合成与分解体现了用等效的方法研究物理问题的思想。

合成与分解是为了便于研究问题而引入的一种方法。用合力来代替几个力时必须把合力与各分力分开，即考虑合力则不能考虑分力；同理，在力的分解时只考虑分力而不能同时考虑合力。

1. 力的合成

1）力的合成的本质就在于保证作用效果相同的前提下，用一个力的作用代替几个力的作用，这个力就是那几个力的“等效力”（合力），如图 2-8-22 所示。

力的平行四边形定则是运用等效思想，通过实验总结出来的共点力的合成法则，它给出了寻求这种等效代换所遵循的规律。

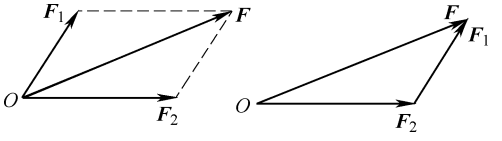


图 2-8-22　力的合成

2）平行四边形定则可简化成三角形定则。由三角形定则还可以得到一个有用的推论：如果 n 个力首尾相接组成一个封闭多边形，则这 n 个力的合力为零。

3）共点的两个力合力的大小范围为

$$|F_1 - F_2| \leqslant F_{合} \leqslant F_1 + F_2$$

4）共点的三个力合力的最大值为三个力的大小之和，最小值可能为零。

例 1：如图 2-8-23 所示，物体受到互相垂直的两个力 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$ 的作用，若两力大小分别为 $5\sqrt{3}$N、5N，求这两个力的合力。

解析：根据平行四边形定则作出平行四边形，由于 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$ 相互垂直，所以作出的平行四边形为矩形，对角线分成的两个三角形为直角三角形，由勾股定理得

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(5\sqrt{3})^2 + 5^2} = 10(\mathrm{N})$$

合力的方向与 $\boldsymbol{F}_1$ 的夹角 θ 为

$$\tan\theta = \frac{F_2}{F_1} = \frac{5}{5\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3}, \text{得 } \theta = 30°$$

例 2：如图 2-8-24a 所示，物体受到大小相等的两个拉力的作用，每个拉力均为 200N，两力之间的夹角为 60°，求这两个拉力的合力。

解析：根据平行四边形定则，作出如图 2-8-24b 所示的示意图，它是一个菱形，可以利用其对角线互相垂直且平分各角的关系，通过解其中的直角三角形求合力。

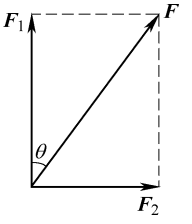


图 2-8-23　例 1 图

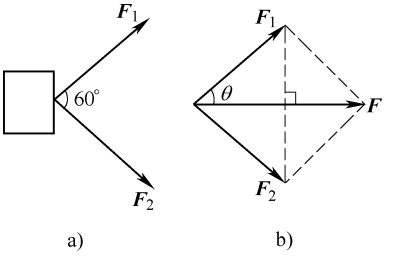


图 2-8-24　例 2 图

$$F = 2F_1\cos 30° = 200\sqrt{3}\text{N} = 346\text{N}$$

合力与 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$ 的夹角均为 30°。

求矢量时要注意不仅要求出其大小，还要求出其方向，其方向通常用它与已知矢量的夹角表示。

2. 力的分解

1）力的分解遵循平行四边形定则，力的分解相当于已知对角线求邻边。

2）两个力的合力唯一确定，一个力的两个分力在无附加条件时，从理论上讲可分解为无数组分力，但在具体问题中，应根据力实际产生的效果来分解。

例如，将斜面上质量为 m 的物体的重力 $m\boldsymbol{g}$ 分解为下滑力 $\boldsymbol{F}_1$ 和物体压紧斜面的力 $\boldsymbol{F}_2$，$\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$ 是重力 $m\boldsymbol{g}$ 的分力，如图 2-8-25 所示。

将一个力分解为两个互相垂直的力，有无数种分法。在表示这个力的有向线段的一端任意画一条直线，在有向线段的另一端向这条直线作垂线，就是一种方法，如图 2-8-26所示。

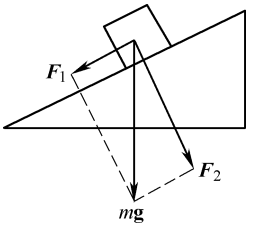


图 2-8-25　力的分解

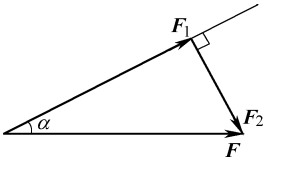


图 2-8-26　分解力的方法

3）几种有条件的力的分解。

① 已知一个合力和两个分力的方向，求两个分力的大小时，有唯一解，如图 2-8-27a所示。

② 已知一个合力和一个分力的大小和方向，求另一个分力的大小和方向时，有唯一解，如图 2-8-27b 所示。

③ 已知一个合力和两个分力的大小，求两个分力的方向时，其分解方法不唯一。

④ 已知一个合力和一个分力的大小和另一个分力的方向，求这个分力的方向和另

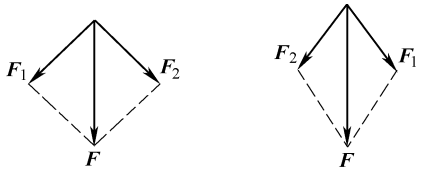
一个分力的大小时，其分解方法可能唯一，也可能不唯一。

4）用力的矢量三角形定则分析力最小值的规律。

① 当已知合力 $\boldsymbol{F}$ 的大小、方向及一个分力 $\boldsymbol{F}_1$ 的方向时，另一个分力 $\boldsymbol{F}_2$ 取最小值的条件是两分力垂直，$\boldsymbol{F}_2$ 的最小值为 $\boldsymbol{F}_{2\min}=\boldsymbol{F}\sin\alpha$，如图 2-8-28a 所示。

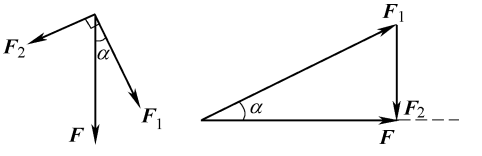
② 当已知合力 $\boldsymbol{F}$ 的方向及一个分力 $\boldsymbol{F}_1$ 的大小、方向时，另一个分力 $\boldsymbol{F}_2$ 取最小值的条件是：所求分力 $\boldsymbol{F}_2$ 与合力 $\boldsymbol{F}$ 垂直，如图 2-8-28b 所示，$\boldsymbol{F}_2$ 的最小值为

$$\boldsymbol{F}_{2\min}=\boldsymbol{F}_1\sin\alpha$$



a) b)

图 2-8-27　有条件的力的分解



a) b)

图 2-8-28　最小值规律

③ 当已知合力 $\boldsymbol{F}$ 的大小及一个分力 $\boldsymbol{F}_1$ 的大小时，另一个分力 $\boldsymbol{F}_2$ 取最小值的条件是：已知大小的分力 $\boldsymbol{F}_1$ 与合力 $\boldsymbol{F}$ 同方向，$\boldsymbol{F}_2$ 的最小值为 $|\boldsymbol{F}-\boldsymbol{F}_1|$。

5）正交分解法。把一个力分解成两个互相垂直的分力，这种分解方法称为正交分解法。

用正交分解法求合力的步骤如下：

① 首先建立平面直角坐标系，并确定正方向。

② 把各个力向 X 轴、Y 轴上投影，但应注意，与确定的正方向相同的力为正，与确定的正方向相反的为负，这样，就用正、负号表示了被正交分解的力的分力的方向。

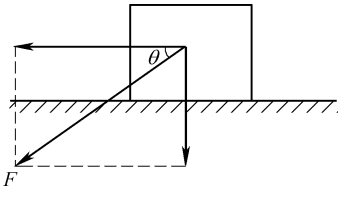


图 2-8-29　正交分解法

③ 求在 X 轴上的各分力的代数和 $F_{x合}$ 和在 Y 轴上的各分力的代数和 $F_{y合}$，如图 2-8-29 所示。

④ 求合力的大小：$F=\sqrt{(F_{x合})^2+(F_{y合})^2}$。

合力的方向：$\tan\alpha=\dfrac{F_{y合}}{F_{x合}}$（$\alpha$ 为合力 $\boldsymbol{F}$ 与 X 轴的夹角）。

三、综合应用举例

例 1：质量为 m 的木块在推力 $\boldsymbol{F}$ 作用下，在水平地面上做匀速运动。已知木块与地面间的动摩擦因数为 μ，那么木块受到的滑动摩擦力大小为下列各值的哪个？

A. μmg　　B. $\mu(mg+F\sin\theta)$　　C. $\mu(mg-F\sin\theta)$　　D. $F\cos\theta$

解析：木块匀速运动时受到四个力的作用：重力 $m\boldsymbol{g}$、推力 $\boldsymbol{F}$、支持力 $\boldsymbol{F}_N$、摩擦力 $\boldsymbol{F}_\mu$ 沿水平方向建立 X 轴，将 $\boldsymbol{F}$ 进行正交分解，如图 2-8-30 所示（这样建立坐标系只需

分解 $\boldsymbol{F}$），由于木块做匀速直线运动，所以，在 X 轴上，向左的力等于向右的力（水平方向二力平衡）；在 Y 轴上向上的力等于向下的力（竖直方向二力平衡），即

$$F\cos\theta = F_{\mu}, F_{N} = mg + F\sin\theta$$

又由于 $F_{\mu} = \mu F_{N}$

所以 $F_{\mu} = \mu(mg + F\sin\theta)$，故 B、D 答案是正确的。

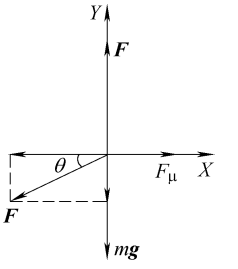


图 2-8-30　综合应用例 1

例 2：横梁的一端 A 插在墙壁内，另一端装有一小滑轮 B，轻绳的一端 C 固定于墙上，另一端跨过滑轮后悬挂质量 $m = 10\text{kg}$ 的重物，$\angle CBA = 30°$，如图 2-8-31 所示，则滑轮受到绳子的作用力为（$\boldsymbol{g} = 10\text{m/s}^2$）

A. 50N　　B. $50\sqrt{3}$N　　C. 100N　　D. $100\sqrt{3}$N

解析：取小滑轮作为研究对象，悬挂重物的绳中的弹力是 $T = mg = 10 \times 10\text{N} = 100\text{N}$，故小滑轮受绳的作用力沿 BC、BD 方向的大小都是 100N，分析受力如图 2-8-31b所示。

由于 $\angle CBD = 120°$，$\angle CBF = \angle DBF$，所以 $\angle CBF = 60°$，$\triangle CBF$ 是等边三角形，故 $F = 100\text{N}$。C 选项正确。

例 3：一根长 2m，重力为 **G** 的均匀直棒 AB，用两根细绳水平悬挂在天花板上，如图 2-8-32 所示，求直棒重心 C 的位置。

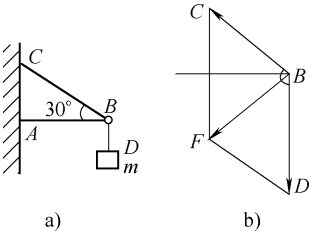


图 2-8-31　综合应用例 2

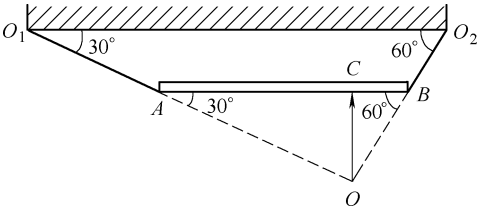


图 2-8-32　综合应用例 3

解析：当一个物体受三个力作用而处于平衡状态，如果其中两个力的作用线相交于一点。则第三个力的作用线必通过前两个力作用线的相交点，把 O_1A 和 O_2B 延长相交于 O 点，则重心 C 一定在过 O 点的竖直线上，如图 2-8-32 所示。由几何知识可知：

$$BO = AB/2 = 1\text{m},\ BC = BO/2 = 0.5\text{m}$$

故重心应在距 B 端 0.5m 处。

例 4：如图 2-8-33a 所示，质量为 m 的球放在倾角为 α 的光滑斜面上，试分析挡板 AO 与斜面间的倾角 β 为多大时，AO 所受压力最小？

解析：虽然题目问的是挡板 AO 的受力情况，但若直接以挡板为研究对象，因挡板所受力均为未知力，将无法得出结论。以球为研究对象，球所受重力产生的效果有两个：对斜面产生的压力 N_1、对挡板产生的压力 N_2，根据重力产生的效果将重力分解，如图 2-8-33b 所示。

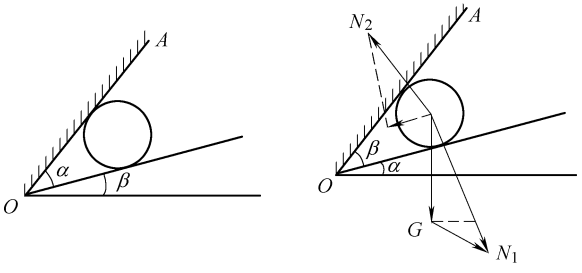


图 2-8-33　综合应用例 4

当挡板与斜面的夹角 β 由图示位置发生变化后，$\boldsymbol{N}_1$ 大小改变但方向不变，始终与斜面垂直，$\boldsymbol{N}_2$ 的大小和方向均改变，如图 2-8-33b 中虚线所示，可看出挡板 AO 与斜面垂直即 $\beta=90°$时，挡板 AO 所受压力最小，最小压力 $N_{min}=mg\sin\alpha$。

第九章
手 工 编 程

第一节　建立工件坐标系

普通机床在操作时没有坐标系设定的问题，对刀之后就可以加工。操作加工中心则需要建立工件坐标系。这是因为编程时使用的坐标系和数控机床本身的机床坐标系是没有关联的，因此工件装夹之后需要告诉数控机床这两个坐标系之间的关系——工件在机床坐标系内的位置之后机床才可以正确地开始工作，告诉的过程就是建立工件坐标系。由于这两个坐标系只有坐标原点不同，因此建立工件坐标系还可以说是在机床坐标系内确定其原点的过程。

加工中心所采用的坐标系属于直角坐标系，由坐标原点和通过原点且互成90°的3根直线轴组成。坐标系分为机械坐标系和工件坐标系，工件坐标系还包括临时坐标系和局部坐标系。

一、坐标系的制定原则

坐标系有两个组成部分：坐标轴与坐标原点，坐标轴有方向和单位。

机械坐标系的坐标轴的方向由“右手定则”确定。按图2-9-1所示伸出右手，此时大拇指、食指、中指分别表示机床的*X*轴、*Y*轴和*Z*轴，指尖指向该轴的正向。

使用右手定则时，有四个前提：①面对机床伸出右手；②所有运动都是假定工件不动而主轴运动；③机床主轴中心方向为*Z*轴方向且刀具远离工件的方向为正方向；④*X*轴永远是水平的。

这样以中指指向主轴正向，大拇指水平放置，则食指指尖即为*Y*轴的正向。这是一个通用规则，无论卧式、立式加工中心都适用。

1. 机床坐标系

机床坐标系又称机械坐标系，是由机床厂家在机床调试之后确定的，用户不能随意修改。

2. 工件坐标系

工件坐标系是为了编程方便而设立的坐标系，其方向与机械坐标系相同，其原点

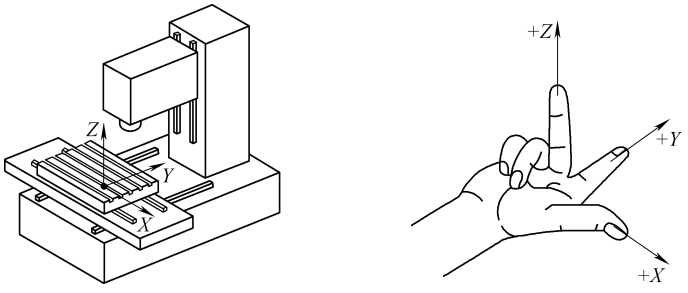


图 2-9-1　机床坐标系和右手定则

由工件上的特殊点确定。

3. 坐标值显示的点

在机床坐标系内，*X*、*Y* 坐标显示的是主轴中心线在 *X*、*Y* 平面内的投影，*Z* 坐标显示的是主轴端面，即在机床坐标系中 *X*、*Y*、*Z* 坐标值显示的点是主轴中心与主轴端面的交点；在工件坐标系中，一般说来无论是否建立刀具半径补偿，*X*、*Y* 坐标显示的都是主轴中心线在 *X*、*Y* 平面内的投影，通过修改参数，可以显示编程坐标，由于这个坐标与刀具半径无关，也就是说无论半径补偿值多大，它显示的坐标值都一样，因此不建议大家使用。

在工件坐标系内不带刀具长度补偿时 *Z* 坐标显示的还是主轴端面，如果已经加上刀具长度补偿，则 *Z* 坐标显示的是刀尖。

第二节　建立工件坐标系的方法

建立工件坐标系包括测量原点数值和将数值输入坐标存储器两个步骤。

前面已经提到建立工件坐标系是为了告诉数控系统工件在机床内的位置，因此测量必须在机床坐标系下进行。

工件坐标系的原点一般根据图样标注选择在容易计算其他坐标的某个基准点处，这个点首先要容易测量，同时测量此基准点所用到的边或孔还应当有一定的精度和表面粗糙度要求。有时需要间接测量，即基准点的坐标是通过测量另外一个点然后经过坐标换算来标定的。

1. 建立 *X*、*Y* 向坐标原点

X、*Y* 坐标的测量工具包括寻边器、标准圆柱或千分表等。

如果基准点的中心是孔的圆心，使用抡表的方法是最直观和简单的。

如果基准点是矩形的某一点，例如矩形的形心或者一个角的顶点。可以使用寻边器或标准圆柱来测量。如果位置精度要求较高，建议尽量使用双边测量的方法，这样可以抵消测量系统（由主轴、刀柄和寻边器组成）的中心线与工作台不垂直所造成的误差。另外计算也简便，没有半径问题，即工件的中心的 *X* 坐标

$$X_0 = (X_1 + X_2)/2 \qquad (2\text{-}9\text{-}1)$$

式中　X_0——工件 X 向坐标中心；

X_1——测量位置 1 的 X 坐标；

X_2——测量位置 2 的 X 坐标。

测量工件中心的 Y 坐标方法与 X 坐标的相同。

如果是单边测量，则要增加或减少一个测量元件的半径（使用标准圆柱时还要包括一个塞尺或垫片的厚度）。到底是增加还是减少取决于测量位置在工件的负方向还是正方向。

对于矩形工件使用抡表来测量也是一个又快又准确的方法。因为在找正的环节一般要使用杠杆表，此时只要将杠杆表移到主轴上，分别在工件的两侧抡表，记下压表量相同时的坐标值之后按式（2-9-1）计算即可。此方法因为在抡表时必须将表杆旋转 180°，自然而然抵消了上述系统误差。

建立工件坐标系的第二个步骤是输入坐标参数，将测量得到的工件坐标系原点 X、Y 坐标手动输入到存储器内，也可以在编程时用赋值语句输入，使用何种方法取决于操作环境。

2. 建立 Z 向坐标原点

建立工件坐标系 Z 向原点不是简单地测量工件 Z 向原点坐标。

前文已经讲过在机床坐标系内，Z 坐标显示的是主轴端面。但是在加工的时候需要知道的是刀尖的位置，一般来说通过主轴端面的 Z 向坐标与刀具长度这两个参数的计算就可以知道刀尖的位置，这就是刀具长度补偿的功能。

数控机床操作是有一定灵活性的，工件坐标系 Z 向原点与刀具长度可以单独设定，也可以绑定在一起设定为工件坐标系 Z 向原点或者刀具长度。由此引出工件坐标系 Z 向原点设定的三种方法，首先介绍最直观的方法一。

方法一：使用主轴端面直接标定工件坐标系 Z 向原点（此处假设是工件的上表面）。

考虑到主轴端面键与机床的安全，不能操作主轴端面直接接触工件表面。正确的操作方法是选择一个平行块，用手摇脉冲发生器移动主轴端面到距离工件表面接近平行块高度的位置，然后将平行块平移到主轴端面与工件表面之间，观察平行块上表面与主轴端面之间的距离，然后挪开，反复操作此步骤直到感觉到平行块与主轴端面有轻微的摩擦为止，记下此时机械坐标系的 Z 值，若机械坐标系 Z 向原点在上方（此值为负值），则将此值加上平行块的高度（此值为正值）之后，就是工件坐标系 Z 向原点在机械坐标系内的坐标位置。

还可以使用光电式寻边器，但是此时需要知道它的刀长，刀长可以在对刀仪上测量，也可以在机床上测量（详见第三篇第三节）。使用光电式寻边器时，由于其在 Z 向有一定的缓冲，所以可以直接接触工件表面。之后的计算方法同上。

使用这种方法，在操作中需要：①设立工件坐标系 Z 向原点；②输入刀具长度参数；③在程序中使用刀具长度正向补偿功能。

其他两种方法见第三篇第三节“3. 工件坐标系 Z 轴原点与刀长的关系”。

第三节　程 序 格 式

一、点位加工

点位加工仅用于加工平面内的孔系，包括钻孔、铰孔、镗孔、攻螺纹等各类孔加工，能实现一个孔到另一个孔的精确移动，移动中不进行切削加工。点位加工是金属切削加工中常见的一种加工方式，加工中心机床具有的固定循环功能是实现点位加工的理想条件。

1. 固定循环

在数控加工中，有些典型的加工工序，是由刀具固定的动作完成的。如在加工中心上钻孔，钻头需要进行快速定位到钻孔位置、快速接近工件、按指定切削速度钻孔、快速回退等固定动作。将这些典型的、固定的几个连续动作，用一条 G 指令来代表，这样，只需用单一程序段的指令即可完成加工，这样的指令称为固定循环指令。多用于孔的加工，包括钻孔、镗孔、铰孔、攻螺纹等，因此加工中心在编制孔加工程序时应使用固定循环指令，以简化编程工作。孔系加工时，孔与孔之间的移动尽量使走刀路线要短，减少空行程时间，提高效率。

固定循环功能是模态指令，一旦指定，就一直保持有效，因此在多孔加工时，该指令只需指定一次，后面的程序段只给出孔的位置即可，直到用 G80 注销为止。此外，G00、G01、G02 和 G03 指令也能起到注销固定循环模式的作用，因此，使用固定循环功能加工孔系的过程中，孔与孔之间的轴移动不应再指定 G00 或 G01。

（1）固定循环功能　固定循环的具体内容见表 2-9-1。

表 2-9-1　固定循环功能表

G 代码	孔加工动作（－Z 方向）	在孔底的动作	刀具返回方式（＋Z 方向）	用　途
G73	逐点进给	—	快速回退	高速深孔钻（断屑）
G74	切削进给	主轴停顿—主轴正转	切削进给	攻左旋螺纹
G76	切削进给	主轴停止、定向—刀具移位	快速回退	精镗孔
G80	—	—	—	取消固定循环
G81	切削进给	—	快速回退	钻孔
G82	切削进给	停顿	快速回退	钻孔、锪孔
G83	间歇进给	—	快速回退	钻深孔（排屑）
G84	切削进给	主轴停顿—主轴反转	切削进给	攻右旋螺纹
G85	切削进给	—	切削进给	镗孔（铰孔）
G86	切削进给	主轴停止	快速回退	镗孔（铰孔）
G87	切削进给	主轴停止、定向—刀具移位	快速返回	反镗孔
G88	切削进给	暂停—主轴停止	手动操作	镗孔（铰孔）
G89	切削进给	暂停	切削进给	镗孔

（2）固定循环操作　固定循环通常由六个动作顺序组成，如图 2-9-2 所示，图中虚线表示快速进给，实线表示切削进给。

动作 1——刀具快速定位到孔加工位置。

动作 2——快速移动到点 *R*。

动作 3——切削进给方式执行孔加工。

动作 4——在孔底部位置（主轴停、主轴反转、刀尖移位等）。

动作 5——返回到 *R* 点。

动作 6——快速返回到初始点。

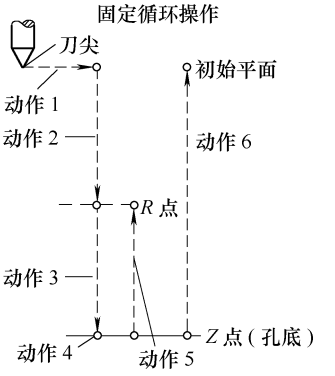
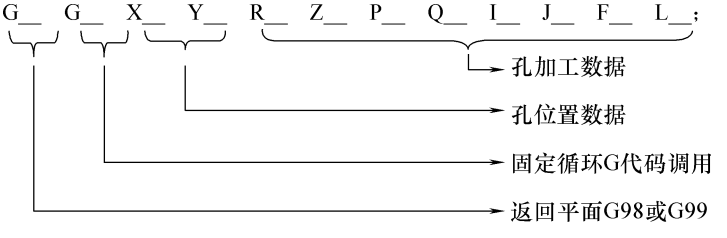


图 2-9-2　固定循环

使用固定循环功能时，需要选择加工平面及钻孔轴，加工平面的确定取决于平面选择指令 G17、G18 和 G19，其相应的钻孔轴分别平行于 *Z* 轴、*Y* 轴和 *X* 轴。立、卧式加工中心机床，加工平面只能是 *XY* 平面，因而钻孔轴平行于 *Z* 轴；对于龙门系列的数控机床，由于配有不同用途的附件铣头，加工平面不只是 *XY* 平面，因而钻孔轴的选择不唯一。

（3）固定循环编程格式



程序格式包括：

1）返回平面控制。

G98 指令使刀具返回到初始平面，即固定循环开始的位置。

G99 指令使刀具返回到 *R* 点平面（参考平面），这个平面是刀具由快速移动转为切削进给的平面，一般取距被加工表面 2～5mm。

2）调用固定循环 G 代码。只能从 G73、G74、G76、G81、G82、G83、G84、G85、G86、G87、G88、G89 指令中选择一个。

3）孔位置数据。孔的位置可以根据需要使用绝对坐标（G90）或增量坐标（G91），轴以 G00 模式移动到钻孔位置。

4）孔加工数据。

R：*R* 点平面，*Z* 轴切削进给率开始位置。

Z：孔加工深度，切削进给率停止位置。

P：暂停时间（单位：ms），不能有小数点。

Q：与 G73、G83 指令一起使用时表示每次钻削深度；与 G76、G87 指令一起使用

时表示刀尖在孔底的偏移量。

I：用于 G76、G87 镗孔循环，表示刀尖在孔底主轴定向后 *X* 轴的偏移量。

J：用于 G76、G87 镗孔循环，表示刀尖在孔底主轴定向后 *Y* 轴的偏移量。

F：切削进给率（单位：mm/min）。

L：固定循环重复次数，如果程序段中为 L0，则当前位置不执行固定循环。

说明：孔加工数据持续有效，直到固定循环模式改变或被取消。

（4）固定循环描述

1）高速深孔钻循环（G73）如图 2-9-3 所示。

编程格式：G98（G99） G73 X_ Y_ R_ Z_ Q_ F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

Q：逐点加工量。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：钻头快速定位到孔加工位置（*X*，*Y*）→沿 *Z* 向快速运动到参考平面 *R* 点→进行钻孔加工（钻入一个由 *Q* 设定的钻进量，后退一个由系统参数设定的退刀量 *d*，*d* < *Q*，重复以上步骤，直至孔加工深度）→快速退回到初始平面或快速退回到 *R* 平面。

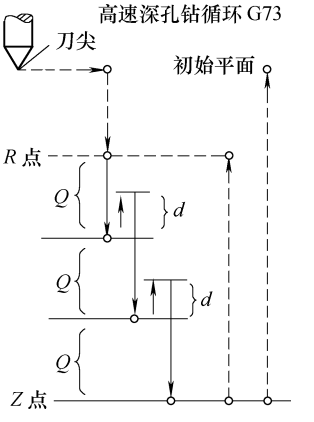


图 2-9-3 G73 高速深孔钻循环

2）左旋攻螺纹循环（G74）如图 2-9-4 所示。

编程格式：G98（G99） G74 X_ Y_ R_ Z_ F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：丝锥快速定位到孔加工位置（*X*，*Y*）→沿 *Z* 向快速运动到参考平面 *R* 点→主轴逆时针旋转，以给定进给速度攻螺纹到 *Z* 点→主轴停转→旋转方向变为顺时针方向→以切削进给速度返回至 *R* 点→主轴停转→主轴旋转方向返回逆时针方向→快速退回到初始平面或停在 *R* 平面。

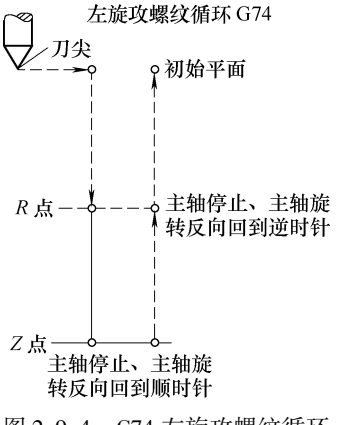


图 2-9-4 G74 左旋攻螺纹循环

攻螺纹循环进给速度 F = 主轴转速 × 螺距；如果进给保持按钮在攻螺纹过程中被按下，攻螺纹循环在退到 R 点之后将停止；攻螺纹过程中，切削进给倍率与主轴转速倍率都固定为 100%，倍率开关调整无效。

3）精镗孔循环（G76）如图 2-9-5 所示。

编程格式：G98(G99)　G76　X_　Y_　R_　Z_　Q_（I_ J_)P_　F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

Q：位移量。

I、J：位移量。

P：孔底停顿时间。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

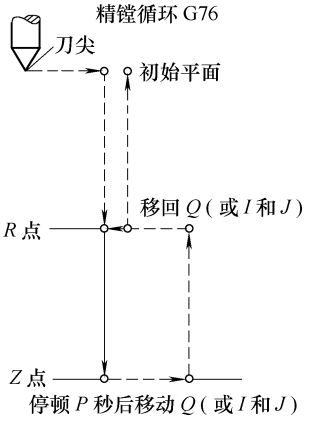


图 2-9-5　G76 精镗孔循环

加工顺序：镗刀快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→镗孔加工→在孔底 Z 点暂停 P 秒后主轴停止旋转、主轴定向、刀具沿刀尖反向偏置 Q（I、J）值后→快速退回到 R 平面→刀具偏置一个位移量 Q 移回孔心→主轴旋转，停在 R 平面或快速退回到初始平面。

4）钻孔循环（G81）如图 2-9-6 所示。

编程格式：G98（G99）　G81　X_　Y_　R_　Z_　F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→钻孔加工→快速退回到初始平面或快速退回到 R 平面。

5）在孔底暂停的钻孔循环（G82）如图 2-9-7 所示。

编程格式：G98（G99）　G82　X_　Y_　R_　Z_　P_　F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

P：孔底停顿时间。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→钻孔加工→孔底主轴不停转，暂停 P 秒→快速退回到初始平面或快速退回到 R 平面。

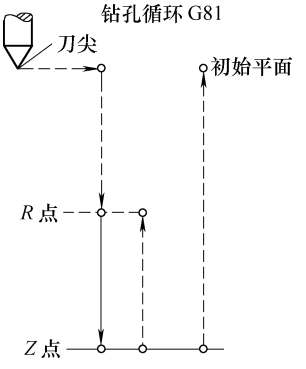


图 2-9-6　G81 钻孔循环

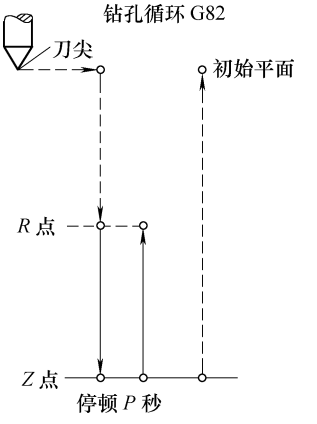


图 2-9-7　G82 在孔底暂停的钻孔循环

6）深孔钻循环（G83）如图 2-9-8 所示。

编程格式：G98（G99）　G83　X_　Y_　R_　Z_　Q_　F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

Q：逐点加工量。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：钻头快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→钻孔加工（钻入一个由 Q 设定的钻进量，快速返回至 R 点，在第二个和后面的钻孔操作中，将在前面钻孔深度上，后退一个由系统参数设定的退刀量 d_1 进行定位，然后按“$Q+d_1$”进行钻孔，快速返回至 R 点。重复以上步骤，直至孔加工深度）→快速退回到 R 平面或快速退回到初始平面。

7）攻螺纹循环（G84）如图 2-9-9 所示。

编程格式：G98（G99）　G84　X_　Y_　R_　Z_　F_ ；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

F：进给速度。

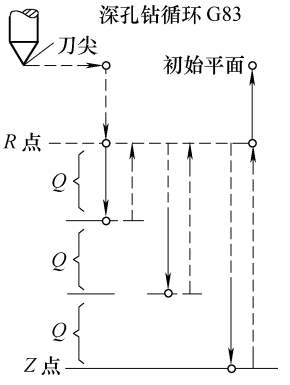


图 2-9-8　G83 深孔钻循环

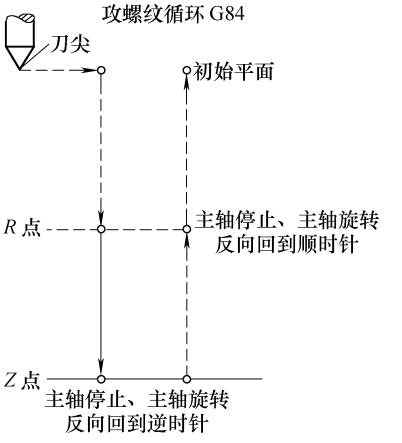


图 2-9-9　G84 攻螺纹循环

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：丝锥快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→主轴顺时针旋转，以给定进给速度攻螺纹到 Z 点→主轴停转→主轴旋转方向变为逆时针方向→以切削进给速度返回至 R 点→主轴停转→主轴旋转方向返回顺时针方向→快速退回到初始平面或停在 R 平面。

攻螺纹循环进给速度 F = 主轴转速 × 螺距；如果进给保持按钮在攻螺纹过程中被按下，攻螺纹循环在退到 R 点之后将停止；攻螺纹过程中，切削进给倍率与主轴转速倍率都固定为 100%，倍率开关调整无效。

8）镗孔循环（G85）如图 2-9-10 所示。

编程格式：G98（G99）　G85　X_　Y_　R_　Z_　F_；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→进行镗（铰）孔加工到 Z 向深度→以进给速度返回至 R 点→快速退回到初始平面或停在 R 平面。

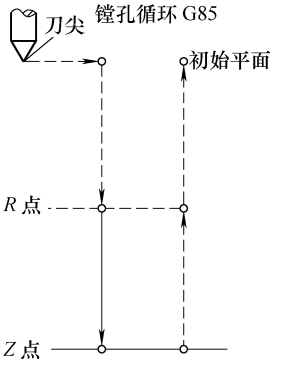


图 2-9-10　G85 镗孔循环

9）镗孔循环（G86）如图 2-9-11 所示。

编程格式：G98（G99）　G86　X_　Y_　R_　Z_　F_；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→进行镗（铰）孔加工到 Z 向深度→主轴停止旋转→快速退回到 R 平面或快速退回到初始平面。

10）退镗循环（G87）如图 2-9-12 所示。

编程格式：G98（G99） G87 X_ Y_ R_ Z_ Q_（I_ J_）F_；

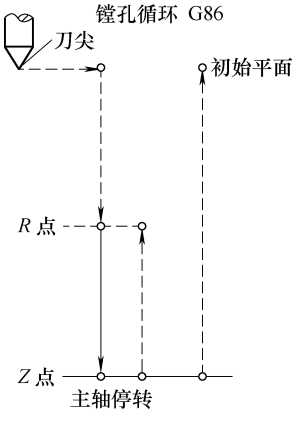


图 2-9-11 G86 镗孔循环

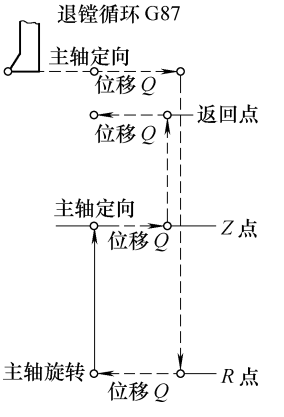


图 2-9-12 G87 退镗循环

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

Q：位移量。

I、J：位移量。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→主轴定向→根据位移量 Q（I、J）的设定，刀具向刀尖反方向偏置一个 Q 值→快速定位到 R 点→刀具向反方向补偿一个位移量 Q→主轴旋转→以规定的切削速度镗孔加工到 Z 向深度→主轴停止旋转→主轴定向→刀具沿刀尖反方向偏置一个 Q 值→快速退回到初始平面→刀具偏置一个位移量 Q 移回孔心→主轴旋转→执行下一程序段。

11）镗孔循环（G88）如图 2-9-13 所示。

编程格式：G98（G99） G88 X_ Y_ R_ Z_ P_ F_；

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

P：孔底停顿时间。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→进行镗（铰）孔加工到 Z 向深度→停顿 P 秒→主轴停止旋转→按循环起动→快速退回到初始平面或快速退回到 R 平面。

12）镗孔循环（G89）如图 2-9-14 所示。

编程格式：G98（G99）　G89　X_　Y_　R_　Z_　P_　F_；

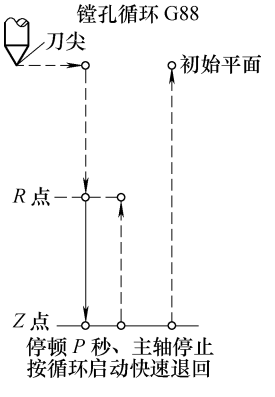


图 2-9-13　G88 镗孔循环

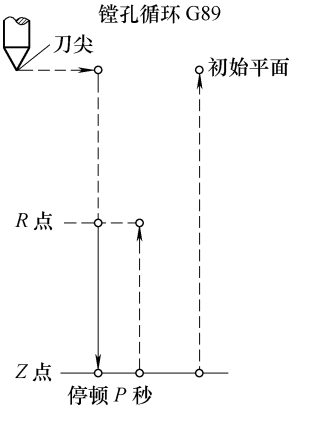


图 2-9-14　G89 镗孔循环

说明：

X、Y：孔定位坐标值。

R：参考平面高度。

Z：孔深度。

P：孔底停顿时间。

F：进给速度。

虚线为快速进给，实线为切削进给。

加工顺序：刀具快速定位到孔加工位置（X，Y）→沿 Z 向快速运动到参考平面 R 点→进行镗（铰）孔加工到 Z 向深度→停顿 P 秒→以进给速度返回至 R 点→快速退回到初始平面或停在 R 平面。

13）固定循环取消（G80）。

编程格式：G80；

说明：G80 取消固定循环模式。调用 G00、G01、G02、G03 指令时固定循环模式

同样被取消；如果轴运动指令与 G80 在同一程序段内设定，则先是固定循环模式取消，随后轴移动。

2. 常见问题和对策

（1）单方向定位　孔系加工中为提高孔的定位精度，保证孔系间位置度要求，轴移动时应采用 G60 单向定位功能，以消除机床传动系统反向间隙误差对定位精度的影响，提高孔的定位精度。而卧式加工中心对箱体类零件的孔系加工，特别是有同轴度要求的对头镗孔时，控制同轴度误差是对头镗孔加工的关键，除了使用 G60 单向定位功能，提高孔的定位精度外，两孔同轴度误差的产生还跟工作台的回转精度、工作台回转中心数据的测量与换算有关，因此工作台回转中心数据的校正要定期进行。

（2）降低孔的表面粗糙度值　G76 精镗孔的目的是提高孔的表面质量，镗刀达到加工深度完成镗孔后，主轴在孔底停转，自动定向，刀具按照给定的位移量 Q（I、J）向刀尖反方向移动，刀尖偏离孔表面后，刀具退回到安全高度，避免划伤已加工孔表面，编程应根据主轴定向状态下镗刀刀尖位置，正确选择位移量 Q（I、J）的方向，避免由于矢量方向选择出现错误，造成刀具、工件的损坏。

（3）深孔加工　钻孔循环 G81 一般用于加工孔深小于 5 倍直径的孔；当孔深大于 5 倍直径时可使用 G73 指令，而深孔加工，特别是长径比较大的深孔，除合理选择刀具和切削用量外，还应考虑排屑、钻头冷却问题。深孔加工过程，不利于排屑，为保证顺利打断并排出切屑，应使用 G83 指令，加工过程为间歇进给方式，避免排屑不畅，造成钻头折断。如果使用的数控机床具备内冷功能，可使用枪钻加工深孔，效果更好。

（4）简化编程使用子程序　固定循环模式加工孔系，可将各孔坐标位置编成子程序，采用 M98 指令调用到主程序中，既可简化编程，减少编程时坐标位置的错误，又可方便不同刀具的重复使用。孔坐标位置可根据图样尺寸标注的不同方法，结合机床数控系统具有的功能，灵活选用如下方法：

1）点位坐标方法：将相同加工内容的孔坐标放在一个子程序中，编程时可根据图样标注选用绝对坐标 G90 指令或与相对坐标 G91 指令混编。

例：

```
O2011;
X100　Y80;
G91　X30　Y40.5;
…;
M99;
```

2）极坐标方法：将图样上用半径值和角度值表示的孔位置转换成极径和极角表示。

例：

```
O2012;
G90　G16　X[330/2]　Y15;
Y[180+35];
```

…；

G15；

M99；

3）三角函数关系式表示方法：将边长和角度表示的孔位置用三角函数关系式表示，便于自检程序。

例：

O2013；

X[[250/2+5]*SIN[3.5]]　Y[[250/2+5]*COS[3.5]]；

X[[294/2]*SIN[28]]　Y[[294/2]*COS[28]]；

…；

M99；

4）坐标旋转方法：相对角度线有平移关系标注的孔位置。

例：

O2014；

G68　X0　Y0　R47；

X99　Y22；

…；

G69；

M99；

5）直接调用数控系统具有的坐标计算功能。通过指定一条指令，实现固定循环的轴移调用，完成孔系的加工，坐标计算功能包括圆周等分孔、圆周非等分孔、倾斜直线、栅格等，因数控系统相关功能代码各不相同，具体调用方法参照相关手册。

3. 固定循环应用

如图 2-9-15 所示，加工中心进行孔加工，工件材料 45 钢，加工原点 X0、Y0 在孔中心，Z0 在上端面，初始平面高度为 80mm，参考平面 *R* 点高度为 5mm。

选用的刀具及其用途如下：

T01——定心钻，ϕ20mm×90°。钻中心孔及完成 ϕ18mmH7 孔口倒角。

T02——钻头，ϕ10.3mm。钻 M12 螺纹底孔。

T03——钻头，ϕ16mm。钻 ϕ18mmH7 底孔及完成 M12 螺纹孔口倒角。

T04——丝锥，M12mm。攻 M12 螺纹孔。

T05——镗刀，ϕ17.8mm。半精镗 ϕ18mmH7 孔。

T06——铰刀，ϕ18mmH7，铰 ϕ18mmH7 孔。

编写加工程序如下：

O1000；

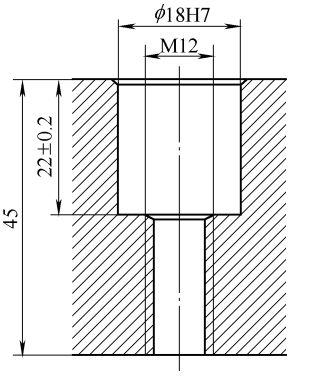


图 2-9-15　用固定循环编程示例

```
N10  T01  M06;(定心钻 φ20mm×90°)
N20  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S800;
N30  G43  H01  Z80;
N40  G98  G82  R5  Z-10  F70  P500  M08;
N50  G80  M5;
N60  G00  G91  G28  Z0;

N70  T02  M06;(钻头 φ10.3mm)
N80  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S800;
N90  G43  H02  Z80;
N100  G98  G83  R5  Z-49  Q3  F80  M08;
N110  G80  M5;
N120  G00  G91  G28  Z0;

N130  T03  M06;(钻头 φ16mm)
N140  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S400;
N150  G43  H03  Z80;
N160  G98  G73  R5  Z-26.2  Q2  F60  M08;
N170  G80  M5;
N180  G00  G91  G28  Z0;

N190  T04  M06;(M12 丝锥)
N200  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S260;
N210  G43  H04  Z80;
N220  G98  G84  R-15  Z-48  F455  M08;
N230  G80  M5;
N240  G00  G91  G28  Z0;

N250  T05  M06;(镗刀 φ17.8mm)
N260  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S600;
N270  G43  H05  Z80;
N280  G98  G86  R5  Z-22.2  F60  M08;
N290  G80  M5;
N300  G00  G91  G28  Z0;

N310  T06  M06;(铰刀 φ18mmH7)
N320  G00  G90  G54  X0  Y0  M03  S140;
```

```
N330  G43  H06  Z80;
N340  G98  G85  R5  Z-22  F100  M08;
N350  G80  M5;
N360  G00  G91  G28  Z0;
N370  G28  Y0;
N380  M30;
```

二、轮廓加工

零件轮廓大多由直线、圆弧及各种曲线构成，多在加工中心用铣削加工的方法，完成零件的内、外轮廓加工。此时，加工路线的确定应保证零件的加工精度和表面粗糙度要求，在编制刀具加工路径时，还应考虑刀具的入刀和出刀方式。因为零件内、外轮廓的铣削加工一般是采用立铣刀侧刃切削，为了避免在切入工件处产生刀具的刻痕，保证工件曲线平滑过渡，通常使刀具沿外轮廓曲线的延长线的切向切入。同理，在刀具切出工件时，也应避免在工件的轮廓处直接退刀，一般采用沿工件轮廓延长线的切向逐渐切离工件。也可采用圆弧切入、切出方式，如图 2-9-16 所示。

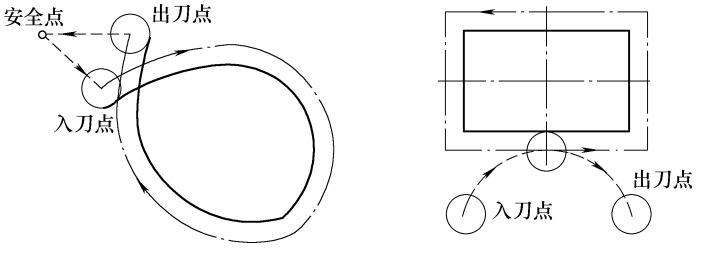


图 2-9-16　圆弧的切入、切出

铣削封闭的内轮廓表面时，如果内轮廓曲线允许外延，可沿轮廓曲线切线方向切入、切出，即圆弧切入、切出方式。如果轮廓曲线无法外延，刀具只能沿轮廓的法向切入和切出，此时刀具的切入和切出点尽量选在轮廓曲线两几何元素的交点处。内圆弧的铣削加工采用切向切入、切出的原则，即刀具路径为圆弧切入→整圆加工→圆弧切出。而粗加工中，为了节省时间，常采用沿零件轮廓的法向直接进刀和退刀。

轮廓加工还应根据工件加工精度和表面粗糙度要求，将粗、精加工分开进行。先进行所有轮廓外形的粗加工，然后再对有精度要求和表面粗糙度要求的轮廓表面进行精加工，粗加工时，轴向切削深度，可根据工件材料的硬度、切削量的大小、刀具的刃长、装夹条件等因素，采用分层铣削的方法去除加工余量。径向切削深度，同样可采取多次走刀的方法，特别是精加工时，为提高零件表面的精度和降低表面粗糙度值，除应尽量采用顺铣加工方式外，还应根据加工刀具和零件材料合理选择加工余量，一般留量 0.15～0.45mm。轮廓精加工中应避免进给停顿，因为刀具在加工过程中，切削力会使工艺系统产生弹性变形并处于相对平衡状态，进给停顿时，切削力突然发生变化，会改变系统的平衡状态，刀具会在进给停顿处的零件轮廓表面上留下刀痕，影响表面质量。

轮廓加工刀具路径的计算因零件轮廓的复杂程度不同，有些尺寸的计算相对复杂，尤其是表面粗糙度值要求低的外形轮廓，因为粗、精加工要分开进行。刀具轨迹的计算更加繁琐。为了避免繁琐的数学计算，简化编程，可使用加工中心数控系统中的刀具半径补偿功能，简化轮廓加工中遇到的点位计算难题。

1. 刀具半径补偿

刀具半径补偿的目的是根据刀具半径补偿值和零件轮廓计算出刀具中心轨迹。在普通铣床用已知半径值 R 的铣刀加工工件轮廓时，刀具中心轨迹必须偏离工件轮廓一个刀具半径值 R，加工时要根据工件轮廓和不同的刀具半径值，计算走刀路径，有些轮廓尺寸的计算相对复杂。当刀具发生磨损及更换不同半径值的刀具时，刀具中心轨迹还需重新计算，否则无法满足图样要求。

加工中心的数控系统具有刀具半径补偿功能，在铣削加工零件轮廓时，不用考虑所用刀具半径的实际尺寸，直接按加工零件轮廓编程，程序中给出刀具半径补偿指令，不必求出刀具中心的运动轨迹，只需在加工或试运行之前在刀具半径补偿参数中输入刀具的实际半径值，就可加工出符合图样要求的内、外轮廓。

（1）刀具半径补偿指令

G41：刀具半径左补偿。

G42：刀具半径右补偿。

G40：取消刀具半径补偿。

刀具半径补偿的方向如图 2-9-17所示。

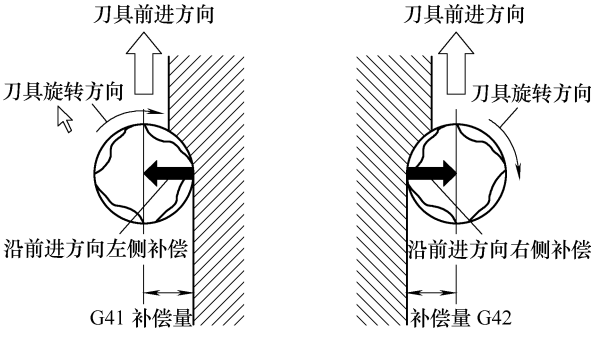


图 2-9-17　刀具半径补偿的方向

ISO 标准规定：沿着刀具前进方向观察，刀具中心轨迹偏在工件轮廓的左边时，用左补偿指令 G41；刀具中心轨迹偏在工件轮廓的右边时，用右补偿指令 G42。

刀具半径补偿过程分为三步，如图 2-9-18 所示。

1）启动刀补：$A \rightarrow B$，轴从定位点移动一段距离，到指定刀补位置。

2）补偿模式：$B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$，刀具在半径补偿下加工工件轮廓，G00、G01、G02 和 G03 指令均有效。

3）取消补偿：$F \rightarrow A$，用指令 G40，同时指定刀具移动位置，补偿模式被取消。

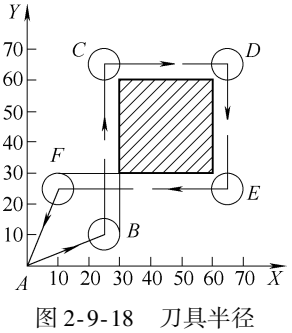


图 2-9-18　刀具半径补偿过程

程序如下：

O1020；

T1　M6；

```
G00　G90　G54　X0　Y0;
G43　H1　Z50;
M3　S600;
Z-8;
G00　G41　D01　X30　Y10;
G01　Y60　F200;
X60;
Y30;
X10;
G00　G40　X0　Y0　M5;
M30;
```

（2）刀具半径补偿功能的优点

1）将工件轮廓作为实际刀具路径来编程，不考虑刀具半径的存在，从而简化编程，避免了繁琐的数学计算。

2）当刀具因磨损、重新刃磨及更换新刀具导致直径改变后，不必修改程序，只需在刀具半径补偿参数中，输入修整后的刀具半径值。

3）同一程序、不同规格的刀具，通过改变刀具半径补偿值，对工件进行由粗至精的加工，逐步达到控制零件轮廓的尺寸精度。

（3）刀具半径补偿功能使用注意事项

1）在执行 G41、G42 及 G40 指令时，轴移动指令只能用 G01 或 G00。

2）使用刀具半径补偿功能时要指定加工平面，数控系统默认加工平面是 G17 平面，当刀具补偿指定在 G17 平面时，刀具半径补偿仅对 X、Y 轴的移动有影响，对 Z 轴没作用。

3）刀具半径补偿值要在加工前或程序试运行前，设定在对应的刀具补偿参数中，其规律是：刀补值为 0 时，刀具按中心轨迹移动；刀具半径补偿值增加，将使刀具远离加工轮廓表面；刀具半径补偿值减少，将使刀具移近加工轮廓表面。即使如此工件轮廓的最终尺寸还跟加工时工件的变形、刀具受力发生挠曲变形及刀具实际尺寸等有关，因此在试加工零件内、外轮廓时，刀具偏置值的设定应大于实际刀具半径值，根据测量结果，对刀补值进行调整，最终到达图样要求。

4）刀具半径补偿功能在结束轮廓加工之后要取消，防止加工其他轮廓时，轴移动后刀具中心点偏离目标位置一个刀补值。

5）程序中使用刀具半径补偿功能时，零件内槽圆角的大小将决定刀具直径的大小，处理不好加工过程中会出现报警或产生过切现象。

刀具半径补偿时过切现象主要发生在：加工半径小于刀具半径的内圆弧；外圆弧半径及槽宽度小于刀具半径；加工比刀具半径小的台阶；连续两段以上的非补偿平面内移动指令；刀具路径有误。为了避免在刀具半径补偿时发生过切现象，应根据图样合理选择刀具、刀具定位点和走刀路径，特别是启动刀补到刀补补偿模式的路径选择不当，最易发生过切；而取消刀补的最佳路径是让刀具远离被加工工件轮廓表面。

（4）编程实例　铣削加工图 2-9-19 所示的轮廓外形，工件材料为 HT250，料板厚度为 15mm，加工刀具为 ϕ20mm 的硬质合金立铣刀。

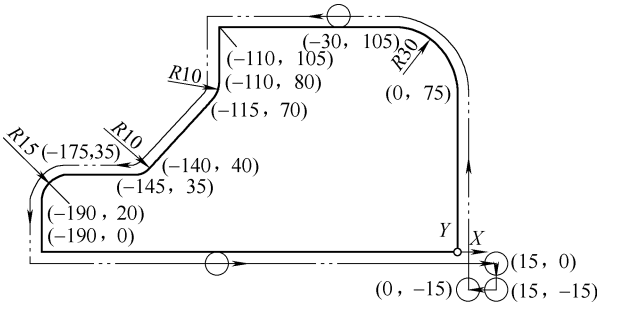


图 2-9-19　铣削外形实例

编写加工程序如下：

```
N10  T01  M06;
N12  G00  G90  G54  X15  Y－15;
N14  G43  H01  Z100;
N16  M03  S400;
N18  Z－18;
N20  G01  G42  D01  X0  Y－15  F150;
N22  Y75;
N24  G03  X－30  Y105  R30;
N26  G01  X－110;
N28  Y80;
N30  G02  X－115  Y70  R10;
N32  G01  X－140  Y40;
N34  G02  X－145  Y35  R10;
N36  G01  X－175  Y35;
N38  G03  X－190  Y20  R15;
N40  G01  Y0;
N42  X15;
N44  G00  G40  Y－15;
N46  Z100  M5;
N48  G91  G28  Z0;
N50  M30
```

三、坐标系旋转

坐标系旋转功能是通过对工件坐标系旋转，定义出新的局部坐标系，是坐标变换功能的常用方法，可使编程图形按照指定的旋转中心及旋转方向旋转一指定角度，避

免繁琐的数学计算，简化程序编制。坐标系旋转的实例如图 2-9-20 所示。

实际应用中如果工件的形状由许多相同的图形组成，可将图形部分编成子程序与坐标旋转功能一起使用，然后调用子程序加工不同位置的相同图形，使加工程序简便准确，减少编程时坐标位置计算错误，方便不同刀具的重复调用。

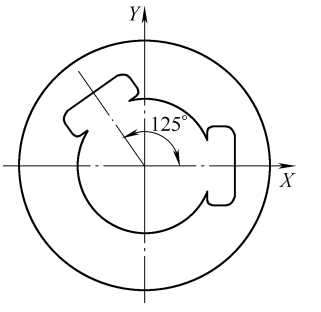


图 2-9-20　坐标系旋转的实例

1. FANUC 系统坐标系旋转指令格式

G68　X_　Y_　R_ ；

…；

G69；

格式说明：

G68：建立坐标系旋转。

X_　Y_ ：坐标系旋转中心，旋转绕该点进行。

R：坐标系旋转角度，它是以变换前的工件坐标系 *X* 轴正方向作为测量基准，旋转方向是逆时针为正，顺时针为负。

G69：注销 G68，使坐标系旋转无效。

2. 坐标旋转功能在实际应用中应注意的事项

1）使用 G68 坐标旋转功能之前，要先选择加工平面（G17、G18 或 G19），如不指定数控系统默认 G17（*X*—*Y*）平面。

2）使用坐标旋转功能时，不一定非在工件原点旋转，可以指定工件以任意一点为轴心，进行坐标系旋转。

3）零件在加工中由于某种原因（刀具异常）中途按了复位键或停止加工了，最好先在 MDI 下，输入相对应的 G69 指令注销之前执行的 G68 坐标旋转功能，或在将要执行的程序段前加上 G69 指令，以免重新启动加工时，机床误操作或刀具位置不正确。

4）调用刀具半径补偿的情况下，使用坐标旋转指令时，应先进行坐标旋转，再指定刀补方向；轮廓加工完成后，先取消刀补再撤销坐标旋转，以免刀具路径变化导致过切现象发生。

因为加工中心数控系统的不同，坐标系旋转功能代码是不同的，使用时需参照相应数控系统操作手册。

3. 编程实例

用坐标旋转 G68 功能编写图 2-9-21 所示的端齿盘加工程序。齿盘端面均布 24 处相同齿形槽，齿形槽的图形轮廓用子程序 O2 表示，以简化编程。

工件材料：42CrMo；刀具选用硬度高、耐磨损的高速钢成形铣刀，对齿盘

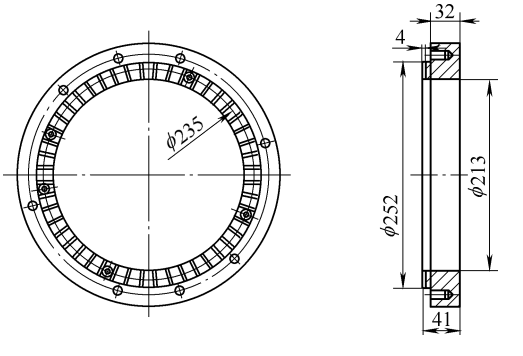


图 2-9-21　编程实例一

端面的 24 个齿形进行粗铣、半精铣加工。端齿盘属于盘类零件，工件的 *X*、*Y* 原点设在端齿盘的中心，Z0 在上端面。选用刀具如下：

T01——成形立铣刀，粗铣齿形。

T02——成形立铣刀，半精铣齿形。

编写加工程序如下：

主程序：

```
O1000;
N10  T01  M6;(粗加工)
N12  G00  G90  G54  X0  Y0;(定位在端齿盘中心)
N14  G43  H01  Z50;(调长度补偿值)
N16  S800  M13  F80;(主轴正转的同时切削液开)
N18  #5 = 1;(1 号刀的刀补值赋值给变量#5)
N20  #4 = 0;(槽起始角度值赋值给变量#4)
N22  M98  P1  L24;(调用子程序)
N24  G90  G00  Z50;
N26  M15;(主轴停转的同时切削液关)
N28  G0  G91  G28  Z0;(回换刀点)
N30  G28  Y0;

N32  T02  M6;(精加工)
N34  G00  G90  G54  X0  Y0;
N36  G43  H02  Z50;
N38  S800  M13  F80;
N40  #5 = 2;
N42  #4 = 0;
N44  M98  P1  L24;
N46  G90  G00  Z50;
N48  M15;
N50  G0  G91  G28  Z0;
N52  G28  Y0;
N54  M30;(程序结束)
```

子程序：

```
O1;
G68  X0  Y0  R#4;(坐标旋转开始)
M98  P2;(对齿形槽铣削加工)
#4 = #4 + 15;(每次递增 15°)
G69;(注销坐标旋转)
```

M99;(返回主程序)

O2;

N1002　G90　G00　X0　Y－139;(刀具定位到安全点)

Z－4.27;(刀尖到齿形加工深度)

G01　G42　D#5　X－7.628　Y－138.5;(加刀补)

X－5.433　Y－105;(齿形轮廓轨迹)

X5.433;

X7.628　Y－138.5;

G00　G40　X0　Y－139;

G00　Z50;

M99;(子程序结束)

四、坐标系平移

坐标系平移是通过对当前工件坐标系原点的局部偏移，定义出新的局部坐标系，也称为“局部工件坐标系设定”。是坐标变换功能的常用方法，以简化编程。偏移后的局部坐标系不能替代当前工件坐标系，它只是在当前工件坐标系原点基础上设置了一个新的临时程序原点，如图2-9-22所示。

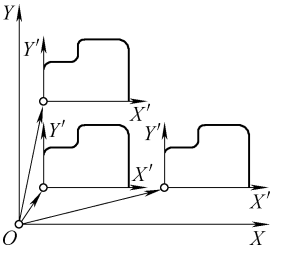


图2-9-22　坐标系平移

坐标系平移功能，在数控加工中应用广泛。当一次装夹加工多个相同零件或某个零件的形状由许多相同的图形组成，可将相同部分编成子程序，在程序中使用坐标平移的方法，设定工件原点的变换，然后调用子程序加工不同位置的相同零件，可缩短编程时间，且程序的修改、调整变得相对简单而清晰。

1. FANUC系统工件坐标系平移指令格式

G52　X_　Y_　Z_ ;

…;

G52　X0　Y0　Z0;

格式说明：

G52：建立坐标系平移。

X_　Y_　Z_ ：坐标平移量，指局部坐标系的原点距当前工件坐标系原点的绝对坐标位置，可是“X、Y、Z”的任意组合。

G52　X0　Y0　Z0：取消局部坐标系。

2. 坐标系平移指令编制加工程序注意要点

G52用于设定局部坐标系，该坐标系的参考基准是当前设定的工件坐标系原点，平移后的工件坐标系，不能替代也不能改变当前工件坐标系。平移指令之后到注销平移之前的坐标值都是相对局部坐标系原点而言的，当使用“G52　X0

Y0　Z0；”注销坐标系平移之后，刀具运动的坐标值将恢复到初始设定的工件坐标系原点。

因为数控系统的不同，坐标平移功能代码有所不同，使用时需参照相应数控系统操作手册。

3. 编程实例

用坐标平移方法编写图 2-9-23 所示的矩形轮廓 *A* 的加工程序，矩形轮廓 *A* 的加工编成子程序 O1。

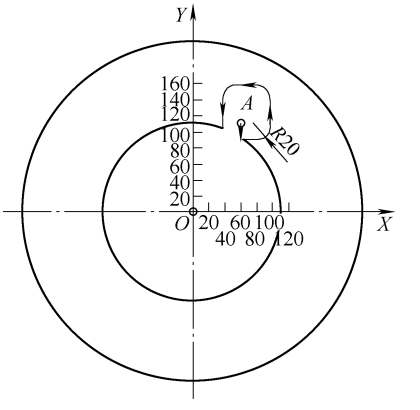


图 2-9-23　编程实例二

工件材料：HT250；加工深度为 10mm。工件 *X*、*Y* 原点在圆形工件中心，Z0 在上端面，加工刀具使用 ϕ16mm 硬质合金立铣刀。

编写加工程序如下：

```
主程序：
O3000；
N10　T01　M06；
N20　G00　G90　G54　X0　Y0；
N30　G43　H01　Z80；
N40　M03　S400；
N50　M98　P3001；(调用矩形轮廓 A 加工子程序)
N60　G00　Z100；
N70　M5；
N80　G00　G91　G28　Z0；
N90　M30；
子程序：
O3001；
N3010　G52　X40　Y90；(新原点)
G00　X20　Y20；
Z－10；(加工深度)
G01　G41　D01　Y0　F140；(轮廓加工)
X40；
G03　X60　Y20　R20；
G01　Y50；
G03　X40　Y70　R20；
G01　X20；
G03　X0　Y50　R20；
G01　Y20；
```

G03　X20　Y0　R20；
G00　G40　Y20；
G52　X0　Y0；
M99；

五、主程序与子程序

1. 程序的组成

程序是按照一定的格式并以代码的形式编制的。一个完整的程序由程序号、程序的内容和程序结束三部分组成。

例如：O0002；　　程序号

T01 M6；
G00 G90 G54 X0 Y0；
G43 H1 Z100；
M3 S800 F80；
G98 G81 R5　Z－16；
G80 M5；　　程序内容

M30；　　程序结束

1）程序号：程序开始部分。为了区别存储器中的程序，每个程序都要有程序编号，以便于从数控存储器中检索和调用，不同的零件程序号是唯一的。FANUC 系统采用大写英文字母 O 作为程序编号地址与后面四位数字的组合表示程序名称。

2）程序内容：是整个程序的核心，由许多程序段组成，每个程序段由一个或多个指令构成。

3）程序结束：用 M02 或 M30 作为一个程序结束的符号，放在程序的最后。M02 与 M30 的区别是：读到 M30 指令，程序结束并返回到程序起始处。

2. 主程序与子程序

数控加工程序分为主程序和子程序两种，主程序是一个完整的零件加工工艺过程，是零件加工的主体部分。数控系统按主程序运行，因为数控操作系统不同，程序的语言规则和格式也不尽相同，加工程序包含了零件的工艺过程、工艺参数、机床的运动以及刀具位移量等信息，理想的加工程序不仅应该保证能加工出符合图样要求的合格零件，还应该使数控机床的各种功能得到合理的应用与充分的发挥，使数控机床能安全、可靠、高效地工作。

由于不同厂家、不同设计人员在零件图上尺寸标注的方法略有不同，编程时可根据机床数控系统的特点，灵活应用，在设计基准、工艺基准、检测基准、与编程原点设置一致的前提下，编程格式和语句越简单，越便于操作越好。一般情况下，将零件图的设计基准定为工件原点，既符合零件图尺寸的标注习惯，又便于编程，主程序根据加工需要可以有多个子程序，并可重复调用。

子程序的结构与主程序相同，由子程序号、程序内容和程序结束三部分组成，主程序是以 M02 或 M30 指令作为加工程序的结束，而子程序是以 M99 指令作为程序结

尾。子程序是相对主程序而言的，主程序可以调用子程序，在编零件加工程序时，当一次装夹加工多个相同零件或工件的形状由许多相同的轮廓组成，可以把重复加工部分编成一个子程序，使用时反复调用。子程序的使用主要应用在以下几个方面：

1）零件轮廓的粗、精加工。进行轮廓加工时，粗、精加工刀具所经过的路径相同，将该路径编写成子程序，以便粗、精加工时调用。

2）轮廓粗加工时的分层铣削。轮廓进行粗加工时，如果铣削深度较大，受切削力和刀具强度的限制，选用的刀具不能一次完成切削加工，可将加工路径编成子程序，进行分层铣削加工，刀具每加工一层就调用一次子程序，直到完成图样加工深度。

3）零件上有多处完全相同轮廓的加工。将加工轮廓编成子程序，经过坐标系变换后进行调用，从而缩短程序长度，达到简化编程的目的。

4）固定循环模式孔系加工时，可将各孔坐标位置编成子程序，采用 M98 指令调用到主程序中，既可简化编程，减少编程时坐标位置的错误，又可方便不同刀具的重复使用。

3. FANUC 系统子程序调用格式

M98 P_　L_ ；

式中　M98——子程序调用指令；

P——子程序号；

L——子程序重复调用次数，若省略，则表示只调用一次。

不同数控系统子程序的调用指令和格式均不相同，详见所用数控系统操作手册。

子程序可以被主程序调用，同时子程序也可以调用另一个子程序，即子程序嵌套，FANUC 系统子程序可以嵌套四级，如图 2-9-24 所示。

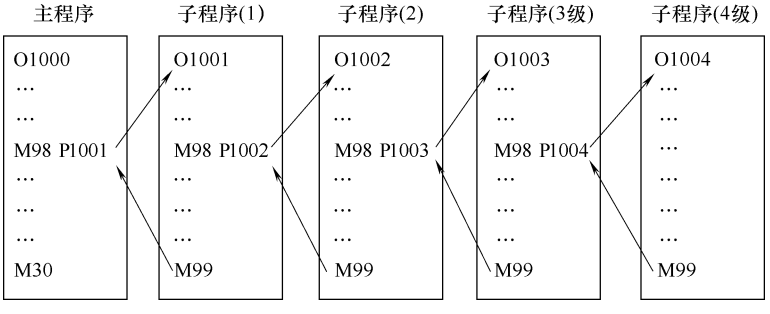


图 2-9-24　主程序与子程序的关系

子程序的使用可以简化编程，避免繁琐的数学计算，缩短编程时间和工作量，减少程序错误，使程序相对简单而易修改。一般情况下，子程序包含的程序段内容，编程格式常使用 G91 增量模式，或与 G90 模式混编的方法，使程序更加简洁、灵活。

4. 编程实例

如图 2-9-25 所示，加工 6 × M10 螺纹孔，各螺纹孔坐标位置用子程序的方法编程。

工件原点 X0、Y0 在 ϕ56mm 孔中心，Z0 在上端面。

选用的刀具及其用途如下：

T01——定心钻，ϕ12mm×90°。钻中心孔及完成 M10 螺纹孔口倒角。

T02——钻头，ϕ8.5mm。钻 M10 螺纹底孔。

T03——丝锥，M10mm。攻 M10 螺纹。

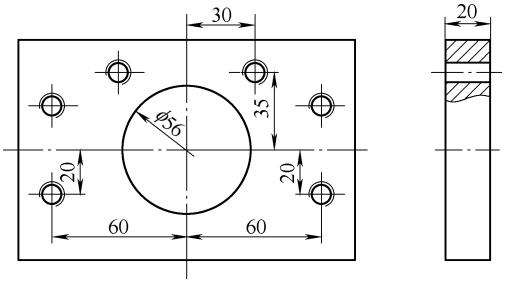


图 2-9-25　编程实例三

编写加工程序如下：

主程序：

```
O3012;
N10 T01  M06;(定心钻 φ12mm×90°)
N20 G00  G90  G56  X0  Y0  M03  S800;
N30 G43  H01  Z80;
N40 G98  G82  R5  Z-6  F80  P500  L0;
N45 M98  P3013;
N50 G80  M5;
N60 G00  G91  G28  Z0;

N70 T02  M06;(钻头 φ8.5mm)
N80 G00  G90  G56  X0  Y0  M03  S800;
N90 G43  H02  Z80;
N100 G98  G81  R5  Z-24  F120  L0;
N105 M98  P3013;
N110 G80  M5;
N120 G00  G91  G28  Z0;

N130 T03  M06;(M10 丝锥)
N140 G00  G90  G56  X0  Y0  M03  S300;
N150 G43  H03  Z80;
N160 G98  G84  R5  Z-25  F450  L0;
N165 M98  P3013;
N170 G80  M5;
N180 G00  G91  G28  Z0;
N370 G28  Y0;
N380 M30;
```

子程序：

O3013；(孔坐标位置)

N1 X60　Y－20；

N2 Y20；

N3 X30　Y35；

N4 Y－35；

N5 X－60　Y20；

N6 Y－20；

N7 M99；

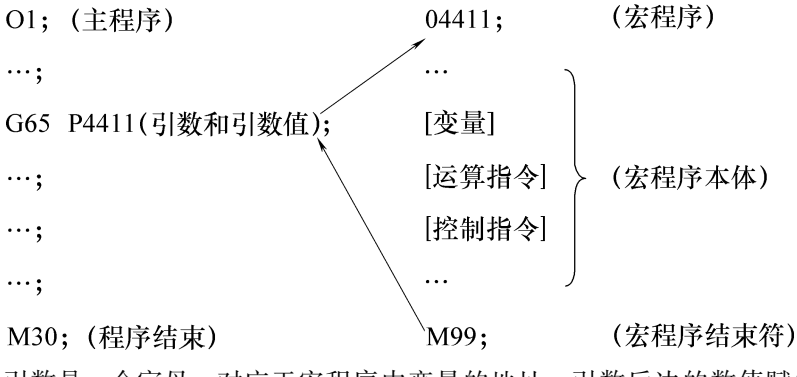
六、宏程序指令

宏程序是指在程序中使用变量，通过对变量的赋值和处理，使程序具有特殊功能，这种有变量的程序叫宏程序。

宏程序与一般加工程序在功能和程序结构上有所不同。加工程序中给定的尺寸数据，通常是固定不变的，叫做常量，如“X30”中的“30”，“R60”中的“60”。而宏程序不但能使用变量，更多的是对变量进行运算、处理，并且用运算的结果控制程序的运行和加工等运动，需要的时候可以用条件判断指令，对一个条件进行判断，根据判断的结果控制程序的走向，进行不同的加工，宏程序具有通用性，能扩展数控机床的功能。用户可以用数控系统提供的宏程序语言指令，根据不同的加工，自行编写宏程序。

宏程序是由若干个程序段组成，每个程序段由一个或几个语句指令组成，宏程序编写格式与子程序相同，程序结尾用 M99 返回主程序。宏程序使用程序号为：O1～O7999。

（1）宏程序格式



一个引数是一个字母，对应于宏程序中变量的地址，引数后边的数值赋给宏程序中与引数对应的变量，同一语句可以有多个引数。

（2）宏程序调用方法

1）非模态调用。

调用格式为：G65　P × × × ×；（宏程序号）

非模态调用宏程序只在一个程序段有效。

例 3-1：非模态调用宏程序

```
O2；主程序                          O4412；宏程序
…；                                G91 G01 G41 D#1 X#2 F#4；
X_ Y_；（执行宏程序）               G03 I-#2；
G65 P4412 A10 B30 I120；            G00 G40 X-#2；
X_ Y_；（不执行宏程序）             G90；
…；                                M99；宏程序结束
M30；程序结束
```

2）模态调用。

调用格式为：G66　P × × × ×；（宏程序号）

模态调用有续效作用，在模态调用宏程序后含有轴移动命令的程序段都将执行调用的宏程序，用 G67 取消宏程序的模态调用。

例 3-2：宏程序模态调用。

```
O3；（主程序）                      O4413；（宏程序）
…；                                G91 G01 G42 D#1 X-[#2-#3] Y-#3；
G66 P4413 A1 B60 C20 I100；         G02 X-#3 Y#3 R#3 F#4；
X80 Y0；（执行宏程序）              I#2；
X0 Y80；                           X#3 Y#3 R#3；
…；                                G00 G40 X[#2-#3] Y-#3；
G67；（取消模态调用）               G90；
M30；（程序结束）                   M99；（宏程序结束）
```

（3）变量　所谓变量是一种能表示数值的可变化的量，与常量的区别就是随条件的不同在不断变化。

1）变量的表示。变量用变量符号“#”和后面的变量号指定，如#I（I = 1，2，3…）。

例如：#1，#109。

表达式可以用于指定变量号，此时表达式必须封闭在括号中，#［＜表达式＞］。

例如：#［#1 + #4 - 10］。

2）变量的使用。在地址号后面指定变量号或公式。

例如：F#103，若#103 = 120，则表示 F120。

Z – #26，若#26 = 16，则表示 Z – 16。

G#13，若#13 = 3，则表示 G03。

X［#24 +［#25 * COS［#1］］］。

而程序号、顺序号和任选程序段跳转号不能使用变量。

3）变量的赋值方法。

① 直接在 MDI 方式下进行赋值。赋值步骤如下：

机床操作面板→选择 MDI 方式→按下功能键“OFFSET SETTING”→按菜单扩展键→宏变量→通过翻页键及光标选择变量→输入数值→按“INPUT”键。将数值直接赋值到指定的变量号中。

② 在程序中用“#_ = 数值”（表达式）将数值赋值到指定的变量号，并在程序中进行应用。

例如：#1 = 3，#5 = 10。

③ 引数赋值，程序中调用宏程序本体，所用变量在宏调用的子程序中赋值。

例如：G65 P4411 A30 B20 C16；

式中 G65——单纯调用宏程序；

P4411——被调用宏程序的程序号；

A30——将数字 30 用引导变量字 A 赋给地址为#1 的变量；

B20——将数字 20 用引导变量字 B 赋给地址为#2 的变量；

C16——将数字 16 用引导变量字 C 赋给地址为#3 的变量。

FANUC 系统提供了两种引数与宏程序体中变量的对应关系，同时还规定：G、L、N、O、P 五个字不能作为引数为变量赋值。变量赋值方法见表 2-9-2 及表 2-9-3。

表 2-9-2 变量赋值方法 I

地 址	变 量 号	地 址	变 量 号	地 址	变 量 号
A	#1	I	#4	T	#20
B	#2	J	#5	U	#21
C	#3	K	#6	V	#22
D	#7	M	#13	W	#23
E	#8	Q	#17	X	#24
F	#9	R	#18	Y	#25
H	#11	S	#19	Z	#26

4）变量的种类。变量有局部变量、公用变量和系统变量三种。

① 局部变量（#1 ~ #33），宏程序中局部使用的变量，断电或按复位键后被初始化为空。

表 2-9-3　变量赋值方法Ⅱ

地　址	变量号	地　址	变量号	地　址	变量号
A	#1	K3	#12	J7	#23
B	#2	I4	#13	K7	#24
C	#3	J4	#14	I8	#25
I1	#4	K4	#15	J8	#26
J1	#5	I5	#16	K8	#27
K1	#6	J5	#17	I9	#28
I2	#7	K5	#18	J9	#29
J2	#8	I6	#19	K9	#30
K2	#9	J6	#29	I10	#31
I3	#10	K6	#21	J10	#32
J3	#11	I7	#22	K10	#33

② 公用变量（#100 ~ #149；#500 ~ #509），公用变量贯穿整个程序过程，能够在任何主程序、子程序中被调用，#100 ~ #149 区域中的变量是非保持型变量，断电后被初始化为空，#500 ~ #509 区域中的变量是保持型变量，断电后仍被保存，公用变量可通过操作面板在 MDI 方式赋值。

③ 系统变量（#1000 以上），是系统固有用途的变量，能够对机床内部变量进行读取和赋值，可被任何程序使用，有些是只读的，有些可以赋值或修改。如：

a. 刀具补偿值的读和写#2000 ~ #2200。

b. 工件零点偏移值的读和写#5201 ~ #5326。

c. 报警信息#3000。

d. 模态信息#4001 ~4120。

（4）运算指令　宏程序具有赋值、算术运算、逻辑运算和函数运算功能，可以对输入的数据进行运算，并且用运算的结果控制机床的移动及加工。运算顺序：括号优先，先乘除后加减。各种运算见表 2-9-4。

（5）控制指令

1）条件分支结构：

IF［<条件表达式>］　GOTO　m

式中 m 是顺序号，特指程序序号 N 后边的顺序号（数字）。

IF 语句的定义：如果条件表达式成立则转移到 m 去执行；如果条件表达式不成立则执行 IF 语句的下一行的程序段。

在 IF 语句中，条件表达式是必不可少的，还要把条件表达式用方括号“［］”括起来。表达式是表明一种数学运算或者是其他运算的式子，一般有以下几种表达式：

表 2-9-4　宏程序运算符号

功　能	格　式	备　注
定义置换	#i = #j	—
加法 减法 乘法 除法	#i = #j + #k #i = #j- #k #i = #j * #k #i = #j/#k	—
正弦 反正弦 余弦 反余弦 正切 反正切	#i = SIN［#j］ #i = ASIN［#j］ #i = COS［#j］ #i = ACOS［#j］ #i = TAN［#j］ #i = ATAN［#j］	角度单位是度，如 90°30′表示为 90. 5°
平方根 绝对值 四舍五入整数化 小数点以下舍去 小数点以下进位 自然对数 指数函数	#i = SQRT［#j］ #i = ARS［#j］ #i = ROUND［#j］ #i = FIX［#j］ #i = FUP［#j］ #i = LN［#j］ #i = EXP［#j］	—
或 异或 与	#i = #j OR #k #i = #j XOR #k #i = #j AND #k	逻辑运算一位一位地按二进制数执行

算数表达式，用来表示如何进行算术运算的式子，式中有加、减、乘、除等运算符号。

例如：#3 + #2。

关系表达式，用来比较两边谁大谁小，或者是否相等的表达式，式中常有 GT（>）、LT（<）、EQ（=）…等运算符，经过比较，会有两个结果，成立或者不成立。

运算符由 2 个字母组成，用于两个值的比较。运算符含义如下：

EQ：等于（=）。NE：不等于（≠）。GT：大于（>）。GE：大于或等于（≥）。LT：小于（<）。LE：小于或等于（≤）。

在 IF 语句中，把关系表达式的“成立”与“不成立”作为控制程序走向的根据，程序执行到 IF 这一行的时候，系统先判断一下条件成立还是不成立，当条件成立，就使程序的运行转移到 GOTO 后面指定的 m（N 行号）去执行；如果条件不成立，程序就转移到 IF 语句的下一行的程序段去执行，这样就实现了分支转移。例如：

O0006；

…；

N120 G0　X100　Y100；

…；

IF［#2 LT 30］　GOTO 120；

…；

M30；

程序中使用 IF 语句时应注意：条件表达式的表述要正确，这是得到正确结果的前提；不能指定程序中不存在的顺序号，否则程序就无法继续运行。

2）循环结构。

WHILE［＜条件表达式＞］　DO m　（m＝1、2、3…）；

循环体程序；

END　m；

WHILE 语句的定义：在 WHILE 后指定一个条件表达式，当指定条件满足时，循环执行 WHILE 与“END　m；”之间的程序段；如果条件表达式不成立，则执行“END m；”后的程序段。例如：

O0007；

…；

WHILE［#3 LT 10］　DO　1；

…；

END　1；

…；

M30；

3）无条件转移语句：

GOTO m；

当程序执行到“GOTO　m；”语句时，将转到标有顺序号 m 的程序段去执行。例如：

O0008；

…；

GOTO　1；

…；

N01　T28　M06；

…；

M30；

（6）宏程序应用

1）计算 1～30 累加的和。程序如下：

O1000；

#1＝0；　　（总和基数初始值）

#2＝1；　　（被加数变量的初值）

```
N6 IF[#2 GT 30]GOTO  10;          (当被加数大于30时跳转到N10语句)
#1 = #1 + #2;                     (计算和数)
#2 = #2 + 1;                      (下一个被加数)
GOTO 6;                           (跳转到N6语句)
N10  M02;                         (程序结束)
```

2）数控机床刀库200次抓刀试验，检测机械手和刀库的稳定性。程序如下：

```
O0006;
N10 #100 = 0;                     (换刀次数)
N20 #101 = 1;                     (刀号)
N30 T#101  M06;                   (交换刀具)
N60 G04  P2000;                   (暂停2s)
N70 G00  G90  G54  X150  Y120;    (机床移动)
N80 #100 = #100 + 1;              (换刀次数累加1)
N90 #101 = #101 + 1;              (刀号递增1)
N100 IF[#101 LE 20]  GOTO  30;    (刀库容量20把刀具)
N110 IF[#100 LE 200]  THEN#101 = 1; (刀号为1)
N120 IF[#100 LE 200]  GOTO  30;
N130 T0;                          (找空刀位)
N140 M06;                         (将主轴刀具换回刀库)
N150 M30;                         (程序结束)
```

3)加长钻头加工深孔。先用短钻头将深孔Z－318mm钻到Z－100mm,再用加长钻头加工剩余深度218mm(318mm－100mm＝218mm)。

说明：

#2　B:孔外安全高度。

#3　C:中途倒屑点。

#4　I:加工起点。

#5　J:返回点。

#9　F:加工进给量。

#17　Q:每次切深。

#26　Z:加工终点。

虚线为快速进给,实线为切削进给。

主程序：

```
O3180;
T21  M06;
G00  G90  G54  X100  Y50;(孔加工位置)
G43  H21  Z150;(调刀具长度补偿值)
G65  P3181  B20  C－15  I－97  J100  F50  Q3  Z－318;(调用宏程序)
```

```
G00　G90　Z150;(加工完成返回指定高度)
M30;
宏程序:
O3181;
M3　S60;(主轴起动)
G90　G00　Z#2;(定位孔外安全点)
G01　Z#3　F1000;(进到孔内倒屑点)
S800;(转速)
M8;(切削液开)
Z#4;(加工起点)
#31 = #4 - #26;(中间变量)
#32 = #4 - #17;(中间变量)
N1　IF[#31 LE #17]　GOTO　5;(当钻孔深度小于#17,跳转到 N5 语句)
G01　Z#32　F#9;(钻孔)
Z#3　F1500;(钻头退到孔口倒屑点)
#33 = #32 + 1;(中间变量)
Z#33;
#32 = #32 - #17;(钻孔深度值)
#31 = #32 - #26;(剩余孔深度)
GOTO　1;(跳转到 N1 语句)
N5　G01　Z#26F#9;(钻到终点深度)
Z#3　F1500;(返回倒屑点)
S60;(转速)
G04　P3000;(暂停)
M9;(切削液关)
G00　Z#5;(退到孔外指定位置)
M5;(主轴停)
M99;(程序结束)
```

第四节　增量编程与绝对值编程

使用绝对值编程还是增量编程首先取决于图样标注。一般选用绝对值编程，因为检查程序时更为直观。但是增量编程有其独到的优势，当增量编程与循环语句结合起来时往往可以简化编程，完成绝对值编程很难完成的工作。

1. 简化编程的原则

无论是在编程直线还是圆弧时，程序段中的坐标表示的都是终点。而起点是在前一个程序段中显示（增量编程时起点就是主轴当前位置）。

以直线为例，“G90　G01　X100　Y100　F50；”这个程序段内“X100　Y100”表示的是主轴移动的终点，移动的方向、距离都要结合前一个程序段来看才知道，无论主轴在什么位置都会移动到（X100，Y100）这个点。而“G91　G01　X100　Y100　F50；”表示的是一个确定的矢量，其方向是45°，长度是 $\sqrt{2\times100}$mm，其终点是由主轴当前位置决定的。这就是为什么主程序的第一个移动指令不能使用增量编程的原因。

简化编程的原则是：移动哪个轴就编辑哪个轴的指令。换句话说不动的轴不编程，可以省略。读程序或写程序时都要清楚地知道哪个程序字可以省略、省略的是什么。例如：

G90　G00　X100；
G91　G00　X100；

虽然两个指令执行结果都是只移动 X 轴，但是两个程序段所默认的 Y 指令的意义却完全不同。G91 默认的是 Y0，增量为 0 就是不动，所以可以省略。G90 默认的 Y 值，代表的是主轴当前位置的 Y 坐标，Y 坐标没有变化也就是在 Y 方向不动，所以也可以省略。

360°的圆弧编程也是这个道理。例如：“G03　I－50　F200；”这是一个完整圆的指令，如果不考虑进给速度指令，只用了两个程序字。其终点与起点重合，X、Y 方向都不动；圆心在 Y 方向也不动，所以此程序段中 X、Y、J 三个地址全部省略。但是在坐标系旋转的情况下，虽然程序只指令了一个轴，但是需要两个轴的运动才能到达该点，请看以下的例子，如图 2-9-26 所示。

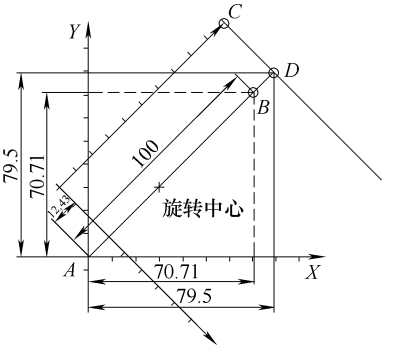


图 2-9-26　坐标系旋转下的增量编程

已知：

…；
G54　G90　G00　X0　Y0；
G68　X30　Y30　R－45；
G1　Y100　F500；
G69　M01；
…；

求：程序执行完后，显示器上的 X、Y 坐标值是多少？

解这道题首先要画出新的坐标系，关键就是找到旋转中心，此处是 X30，Y30 那一点，其次是寻找坐标原点，需要根据旋转中心与原来坐标轴的位置关系来推断。旋转中心到原坐标系 X、Y 轴的距离都是 30mm，而新坐标系的 X、Y 轴顺时针旋转了 45°，由此可以作出新的 X、Y 轴，其交点就是原点。

最后判断终点位置：由于没有 X 轴的编程指令，所以 X 轴在新坐标系内仍然保持

不动，此处提位置而不说坐标，就是因为保持的不是原坐标系内的 X0 坐标，而是 X0 转化在新坐标系内的 X30 这一位置。所以程序段的终点是 D（新坐标系 X30，Y100）。

由于坐标系旋转的度数不是 90°的整倍数，只移动一个轴的编程指令实际走的是斜线，因此需要两个轴的移动。

此时主轴移动距离并不是由 A 到 B，更不是由 A 到 C，而是由 A 移动到 D 点。由于显示器只显示原工件坐标系的坐标，即 D 点在原坐标系 X、Y 轴上的位置，因此程序执行之后，主轴所在位置的坐标为：$X=79.497$，$Y=79.497$。

2. 增量编程的主要用处

1）在同一个坐标系内希望重复调用的轮廓加工的子程序或点位加工的孔的坐标，如果不采用建立局部坐标系的方法，就必须使用增量编程。否则在每次调用时都会回到同一个点。

例如，编辑一个在 ϕ200mm 的圆周上加工均布的 30 个孔的程序就用到增量编程与极坐标编程结合的方法：

```
…;(坐标系原点在 30 个孔的分布中心)
G99  G81  R2  Z-10  F100  K0;
X100  Y0;
G90  G16;
X100  G91  Y12  K29;
G15  G80;
…
```

若是直线排列的孔，改成直角坐标编程即可。

2）增量编程与循环语句结合，可以完成螺纹铣削一类的加工。

FANUC 系统虽然有螺旋插补功能，但是差补范围≤360°，若完成一个螺纹的铣削，需要 n 个 360°，在子程序中使用增量编程，通过多次调用就可以很容易地完成螺纹铣削。例如：加工一个 M50mm×6mm 深 48mm 的螺纹孔，其程序如下：

```
O10;(坐标系原点在螺纹孔中心)
…;
G00  Z3;
G01  G42  X25  Y0  D1  F200;
M98  P11  L9;(为保证螺纹的有效连接尺寸,程序结束时 Z 轴深度为 -51mm)
G00 G40 X0;
Z100;
M2;

O11;
G91  G02  I-25  Z-6;
G90  M99;
```

3）增量编程与坐标系旋转功能相结合，可以完成正多边形分布的轮廓加工。

当一个轮廓是由若干个相同的图形围绕一个中心组成的时候，将其中一个图形编成子程序，用坐标系旋转的指令调用若干次子程序，可以使程序编辑变得简单，这里旋转角度要用增量来表示。

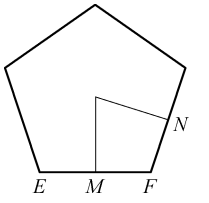


图 2-9-27　用增量编程正五边形

正 N 边形的基本要素包括 1 条边和 1 个 360°/N 的角。作为正 N 边形旋转单元的子程序，必须包括全部基本要素。

加工如图 2-9-27 所示的正五边形，子程序若选择 $E\rightarrow F$，则因为其中没有包含角度因素，加入刀具半径补偿之后整个轮廓会出错。所以子程序所编辑的正确轮廓应当是 $M\rightarrow F\rightarrow N$。

坐标系旋转的指令格式是：G68　X_　Y_　G90（G91）　R_；

关于 G68 的使用，有以下几点说明：

1）程序段中“X_ Y_ ”是以绝对值格式指定的旋转中心。G68 之前的程序段无论是 G90 或是 G91 对“G68　X_　Y_　G90（G91）　R_；”均无影响。但是若写成“G90　G68　X_　Y_　G91　R_；”则机床报警“程序格式错误”。如果 R 之前没有指定是 G90 还是 G91（即 G68　X_　Y_　R_；），R 的指令格式就取决于 G68 之前的程序段是以绝对值还是增量编程了。

2）当“X_　Y_ ”省略时旋转中心为主轴当前位置。

3）G68 之后的程序段出现 G91 编程时，则旋转中心改为主轴当前位置。此时原绝对值指定的旋转中心不再起作用。

4）G69 为取消坐标系旋转，在它之后的第一个移动指令必须用绝对值编程。否则移动会出现错误。

3. 绝对值和增量可以混合编程

虽然绝对值和增量可以混合编程，但是在同一个程序段中不可以同时出现 G90 和 G91。例如坐标系旋转的格式为：

G68　X_　Y_　G90（G91）R_；

其中，X、Y 无论什么编程格式都是绝对值编程，角度可以使用增量编程，而且使用增量编程往往更方便。

另外极坐标编程时也常常是增量和绝对值混合编程。这时需要仔细考虑。

可以归结为以下六种情况：

1）标准的增量值极坐标编程，如图 2-9-28a 所示。

```
G54　G00　X10　Y10;
G91　G16;
G01　X10　Y30　F1000;
```

2）在增量值极坐标编程后面极径、极角均改为绝对值编程，如图 2-9-28b 所示。

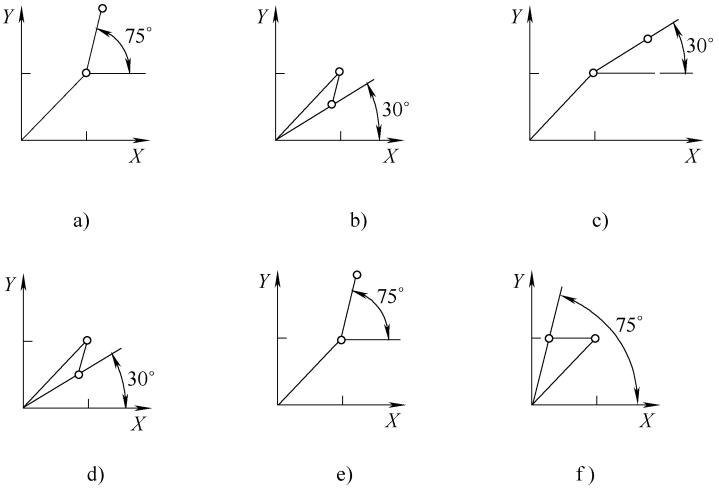


图 2-9-28　增量与绝对值混合编程

```
G54  G00  X10  Y10;        相当于:      G54  G00  X10  Y10;
G91  G16;                               G90  G16;
G01  G90  X10  Y30  F1000;              G01  X10  Y30  F1000;
```

3）在增量值极坐标编程后面仅极角改为绝对值编程，如图 2-9-28c 所示。

```
G54  G00  X10  Y10;
G91  G16;
G01  X10  G90  Y30  F1000;
```

4）标准的绝对值极坐标编程，如图 2-9-28d 所示。

```
G54  G00  X10  Y10;
G90  G16;
G01  X10  Y30  F1000;
```

5）在绝对值极坐标编程后面极径、极角均改为增量值编程，如图 2-9-28e 所示。

```
G54  G00  X10  Y10;              相当于: G54  G00  X10  Y10;
G90  G16;                                G91  G16;
G01  G91  X10  Y30  F1000;               G01  X10  Y30  F1000;
```

6）在绝对值极坐标编程后面仅极角改为增量值编程，如图 2-9-28f 所示。

```
G54  G00  X10  Y10;
G90  G16;
G01  X10  G91  Y30  F1000;
```

第五节　重复图形的几种编辑方法

重复图形的编程是在轮廓加工中经常遇到的问题。如果图形很复杂，以至于不可

能编辑 n 次，可以使用以下方法（在图 2-9-29 中以圆孔代表一个复杂的图形。子程序号为 O101；轮廓间距为 200mm）：

方法一：子程序用增量编程

G01 G91 G41 X40 D1 F500；

…；

简单的轮廓可以使用这种方法，复杂轮廓一般需要绝对值编程。但是在子程序中使用绝对值编程，比如“G00 G90 G41 X40 D01 F500；”，则在调用子程序执行到这个程序段时，主轴马上从当前位置快速移动到当前坐标系的加上刀补值的 X40 点。因此在子程序中需要使用增量编程。

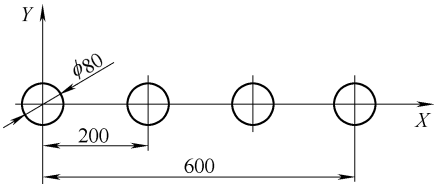


图 2-9-29　重复图形的编辑

若需要使用绝对值编程，可以采用以下方法。

方法二：建立四个工件坐标系，子程序可以用绝对值编程。

G54 M98 P101；

G55 M98 P101；

G56 M98 P101；

方法三：建立四个局部坐标系，子程序可以用绝对值编程。

O100；

…；

M98　P101；

G52　X200；

M98　P101；

G52　X400；

M98　P101；

G52　X600；

M98　P101；

…；

方法四：宏程序赋值，循环改变工件坐标系原点或局部坐标系原点，然后调用子程序。

建立工件坐标系或者局部坐标系可以解决使用绝对值编程的问题，如果要求连续加工多个轮廓，整个程序就过于繁琐。使用宏程序可以很好地解决这个问题。

用宏程序改变工件坐标系坐标原点的程序如下：

O100；

#1 = 0；(#1：当前循环的次数)

WHILE［#1 LE 3］DO1；(3：循环总次数)

G10 L2 P1 X［200 * #1］Y0；(为 G54 坐标系赋值)

G54 M98 P101；(P101：子程序的程序号)

```
#1 = #1 + 1;
END  1;
…;
```

用宏程序循环建立局部坐标系的程序如下：

```
O100;
…;
#1 = 0;(当前循环的次数)
WHILE [#1 LT 4]  DO1;(此处用的是 LT,若用 LE 则要将 4 改为 3)
G65  P101  X[200 × #1];(调用子程序 O101,为 24 号变量赋值:中心距 × 次数)
#1 = #1 + 1;
END  1;
…;
M02;

O101;
G52  X#24 Y0;
…;此处省略子程序加工的内容
M99;
```

方法五：用系统变量建立局部坐标系。

格式为：G52 X#5001 Y#5002；

方法四对于不熟悉宏程序的人来说有些难。使用系统变量则相对容易一些。

系统变量是自动控制和开发通用加工程序的基础，掌握一些系统变量可以大大简化编程工作。例如此处多次调用一个子程序，完成多个相同轮廓的加工就可以借助系统变量。

系统变量#5001、#5002 存储的是在当前坐标系（含局部坐标系）程序段终点的 X 坐标和 Y 坐标，因此利用“G52　X#5001　Y#5002；”可以随着主轴的移动自动建立局部坐标系，这样就可以非常方便地完成多次调用线性排列的同一个轮廓的编程。

其工作原理是这样的，同样假设轮廓间距为 200mm，子程序 O101 格式为：

```
O101;
G52  X#5001  Y#5002;
G00  G90  X0  Y0;
…;(此处省略子程序加工的内容)
G00  Z100;
X200;(移动到下一个轮廓起刀点)
M99;
```

主程序为：

```
O100;
```

…；（此处省略调刀等辅助功能语句）

G54　G90　G00　X0　Y0；

M98　P101　L4；（L4：需要加工的轮廓个数）

G00　X－200；（返回最后一个轮廓中心）

M99；

可以看出此格式很简单。但是将“G52　X#5001　Y#5002；”执行多次之后的坐标列出后发现一个问题：第三次（包含以后的）子程序调用后，新建立的局部坐标系原点仍和第二次的相同（见表2-9-4）。

表2-9-4　建立局部坐标系

坐标 / 调用次序	主轴在当前坐标系的坐标	当前局部坐标系原点在工件坐标系的坐标	主轴在工件坐标系的坐标
第1次调用时	X0，Y0	X0，Y0（局部坐标系1）	X0，Y0
第2次调用时	X0，Y0	X200，Y0（局部坐标系2）	X200，Y0
第3次调用时	X200，Y0	X200，Y0（局部坐标系3）	X400，Y0
第4次调用时	X200，Y0	X200，Y0	X400，Y0

此时#5001、#5002内存储的主轴在局部坐标系2的坐标是（X200，Y0），由此执行完程序段“G52　X#5001　Y#5002；”新建的局部坐标系3的原点仍然在工件坐标系（X200，Y0）处，而需要的是在工件坐标系（X400，Y0）处建立新的局部坐标系。

不过，发现此时主轴在当前工件坐标系内的位置是正确的，因此在子程序中增加一个“返回工件坐标系”的程序段就可能解决问题。

修改之后的子程序：

O101；

G52　X#5001　Y#5002；

G00　G90　X0　Y0；

…；（此处省略子程序加工的内容）

G0　Z100；

X200；（X200是在局部坐标内的值）

G52　X0　Y0；（该指令是非移动指令。返回工件坐标系之后主轴当前位置在第3次调用前是X400；第4次调用前是X600）

M99；

如此修改之后的程序就正确了，格式也较简单。

第十章
计算机辅助加工

第一节　计算机辅助造型

本节通过创建一个简单的型腔体零件实例来介绍 UG NX 软件的造型功能和过程。通过型腔体零件创建实例，学习和掌握 UG NX 软件的草图创建、拉伸创建特征和去除材料、孔特征创建等内容。

一、总体轮廓的创建

工件模型如图 2-10-1 所示。

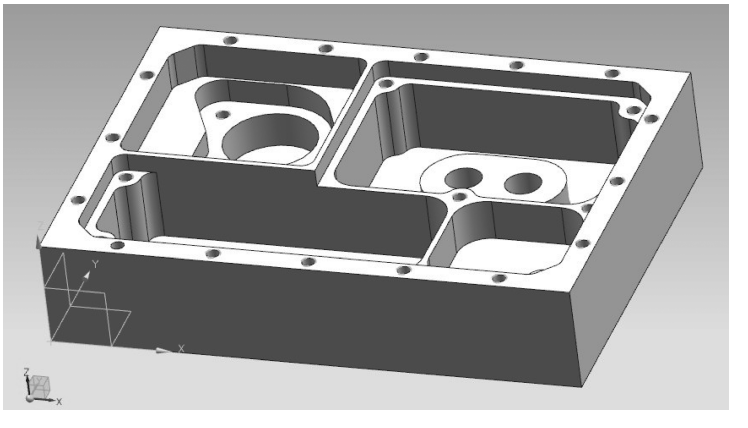


图 2-10-1　工件模型

首先观察工件的整体轮廓，本零件为箱体类零件，总体轮廓为长方体。

1. 参数及其功能介绍

在菜单栏中选择“插入”→“设计特征”→“长方体”，打开“长方体”对话框，如图 2-10-2 所示。

该功能给出了三种长方体建模的方法。

（1）原点和边长　选择“原点和边长”选项，在“指定点”下拉列表框中选择所需要的捕捉点的方式，在视图区域选择或者创建一个点作为长方体左下角的顶点，在“长度（XC）”、“宽度（YC）”和“高度（ZC）”文本框中输入所需数值，接着选择所需的布尔操作类型，创建长方体。

图 2-10-2　“长方体”对话框

（2）两点和高度　选择“两点和高度”选项，在“指定点”下拉列表框中选择所需要的捕捉点的方式，在视图区域选择或者创建两个点作为长方体底面的对角点，在“高度（ZC）”文本框中输入所需数值，接着选择所需的布尔操作类型，创建长方体。

（3）两个对角点　选择“两个对角点”选项，在“捕捉点”下拉列表框中设置所需的捕捉点的方式，在视图区域选择或者创建两个点作为长方体的对角点，接着选择所需的布尔操作类型，创建长方体。

2. 创建步骤

长方体尺寸如图 2-10-3 所示，创建步骤如下：

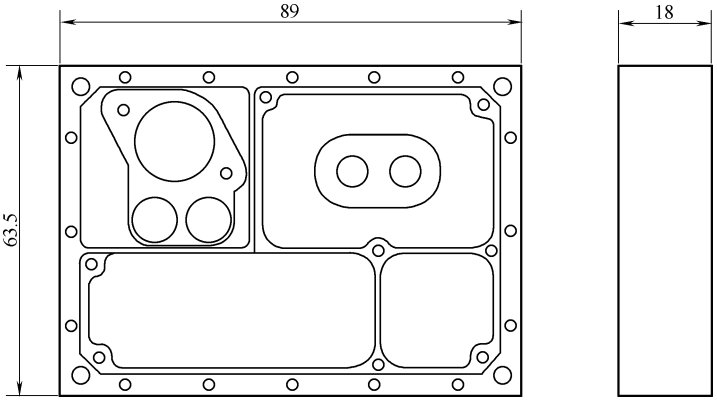


图 2-10-3　长方体尺寸

1）选择一点。

2）若选择“两点和高度”或“两个对角点”选项，要选择另一点。

3）指定所需的布尔运算㊀操作类型，本零件选择“无”。

㊀ 布尔运算（Boolean）通过对两个以上的物体进行并集、差集、交集的运算，从而得到新的物体形态。系统提供了四种布尔运算方式：Union（并集）、Intersection（交集）和 Subtraction（差集，包括 A-B 和 B-A 两种）。

4）单击“确定”或者“应用”按钮，创建长方体特征，如图 2-10-4 所示。

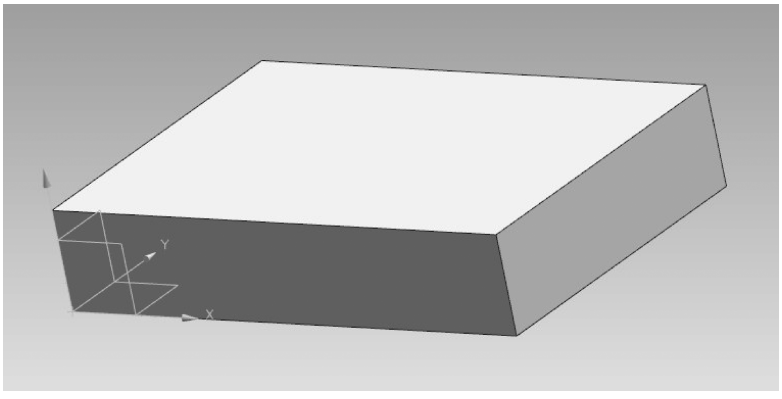


图 2-10-4　长方体特征

二、局部拉伸特征的创建

1. 拉伸特征简介

在菜单栏中选择“插入”→“设计特征”→“拉伸”，弹出“拉伸”对话框如图 2-10-5所示。

拉伸特征是将截面轮廓草图通过拉伸成实体或片体。其草绘截面可以是封闭的也可以是开口的，可以由一个或者多个封闭环组成，封闭环之间不能自交，但封闭环之间可以嵌套，如果存在嵌套的封闭环，在生成添加材料的拉伸特征时，系统自动认为里面的封闭环类似于孔特征。

图 2-10-5　“拉伸”对话框

1）“截面”选项组。

“选择曲线”：用来指定使用已有草图来创建拉伸特征，在“拉伸”对话框中默认为图标。

“绘制草图”：在“拉伸”对话框中，单击按钮，可以在工作平面上绘制草图来创建拉伸特征。

2）“方向”选项组。

“自动判断的矢量”：设置所选对象的拉伸方向。

“反向”：使拉伸方向相反。

3）“限制”选项组。

“开始”：用于限制拉伸的其实位置。

“结束”：用于限制拉伸的终止位置。

4）“布尔”选项组。

在“拉伸”对话框的“布尔”下拉列表框中选择布尔操作命令，包括：“无”、“求和”、“求差”和“求交”。

5）“偏置”选项组。

“单边”：值在截面曲线一侧生成拉伸特征，此时只有“结束”文本框被激活，内侧、外侧偏置特征分别如图 2-10-6 和图 2-10-7 所示。

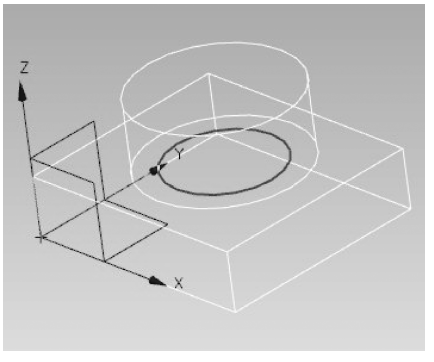


图 2-10-6　内侧偏置特征

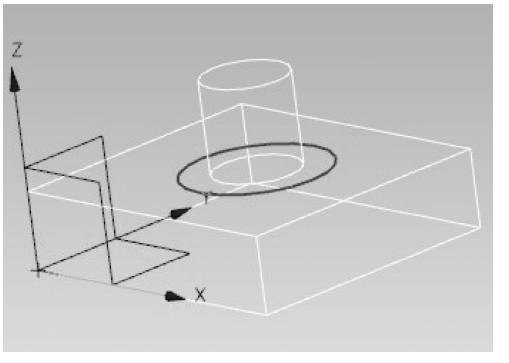


图 2-10-7　外侧偏置特征

“两侧”：只在截面曲线两侧生成拉伸特征，以结束值和起始值之差为实体的厚度，如图 2-10-8 所示。

“对称”：指在截面曲线的两侧生成拉伸特征，其中每一侧的拉伸长度为总长度的一半，如图 2-10-9 所示。

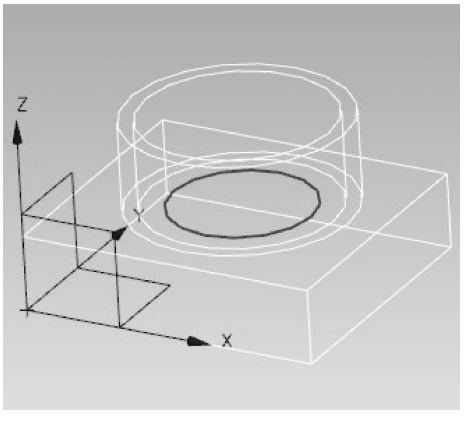


图 2-10-8　“两侧”拉伸特征

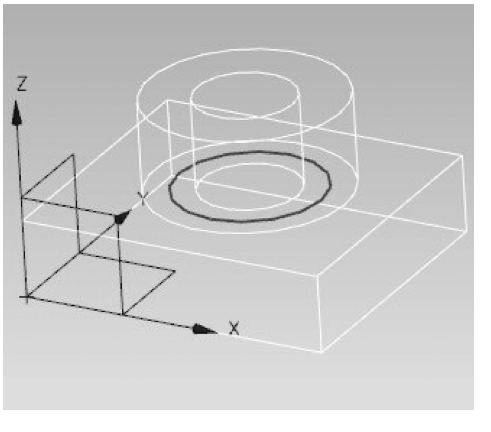


图 2-10-9　“对称”拉伸特征

6）“拔模”选项组。

“角度”：用于设置拉伸方向的拉伸角度。其绝对值必须小于 90°。大于 0°时是沿拉伸方向向内拔模；小于 0°时，是沿拉伸方向向外拔模。

“起始角度”：用于设置拉伸拔模的起始位置。

“从起始限制”：用于设置拉伸拔模的起始位置为拉伸的起始位置，如图 2-10-10

所示。

“从截面”：用于设置拉伸拔模的起始位置为所选取的拉伸截面曲线处，如图 2-10-11所示。

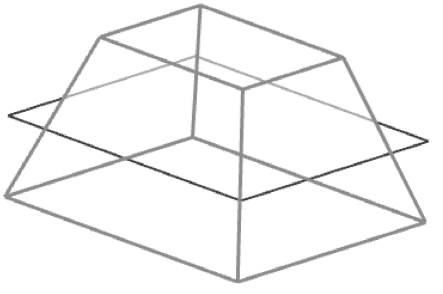


图 2-10-10　“从起始限制”拔模

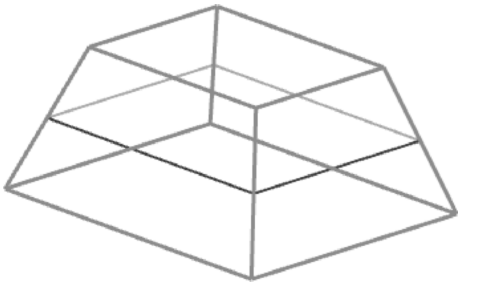


图 2-10-11　“从截面”拔模

“从截面-对称角”：用于设置拉伸拔模的起始位置为所选取的拉伸截面曲线处，但是分别向截面曲线两侧以对称角度拔模，如图 2-10-12 所示。

“从截面匹配到终止处”：用于设置拉伸拔模的起始位置为所选取的拉伸截面曲线处，但是最终的末端截面形状和截面曲线形状相似，如图 2-10-13 所示。

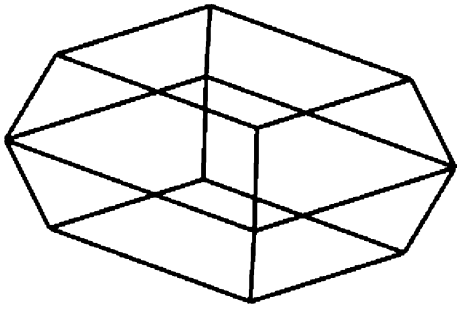


图 2-10-12　“从截面-对称角”拔模

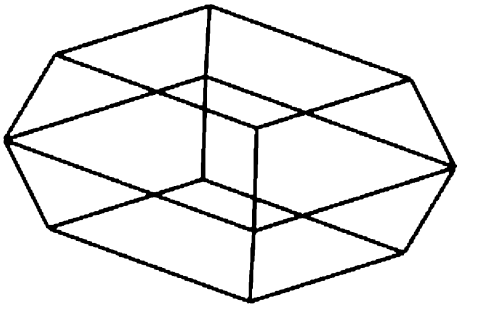


图 2-10-13　“从截面匹配到终止处”拔模

2. 创建拉伸特征

1）创建草图 1。在菜单栏中选择“插入”→“草图”，进入草图绘制界面，选取上一步所做长方体上表面作为草图平面，绘制草图，如图 2-10-14 和图 2-10-15 所示。

2）在菜单栏中选择“插入”→“设计特征”→“拉伸”，打开“拉伸”对话框。选择上步所作草图 1 为草图截面，设置拉伸方向。

3）设置拉伸参数。

开始距离：0。

结束距离：3。

布尔运算：求差，下方“选择体”选项默认选择长方体特征。

其他选项：无。

4）单击“确定”或者“应用”按钮，创建拉伸特征 1，如图 2-10-16 所示。

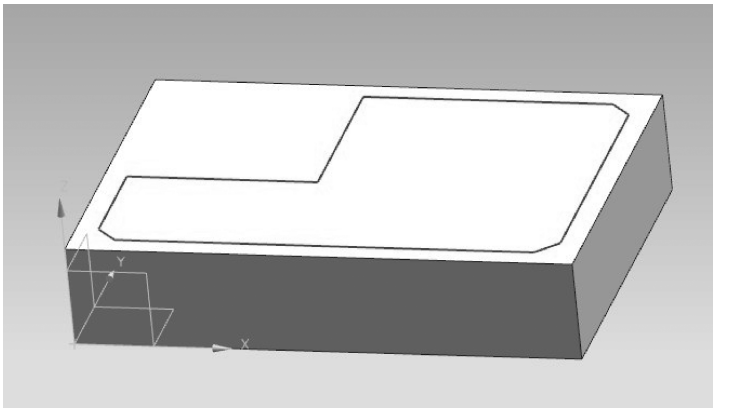


图 2-10-14　绘制草图 1

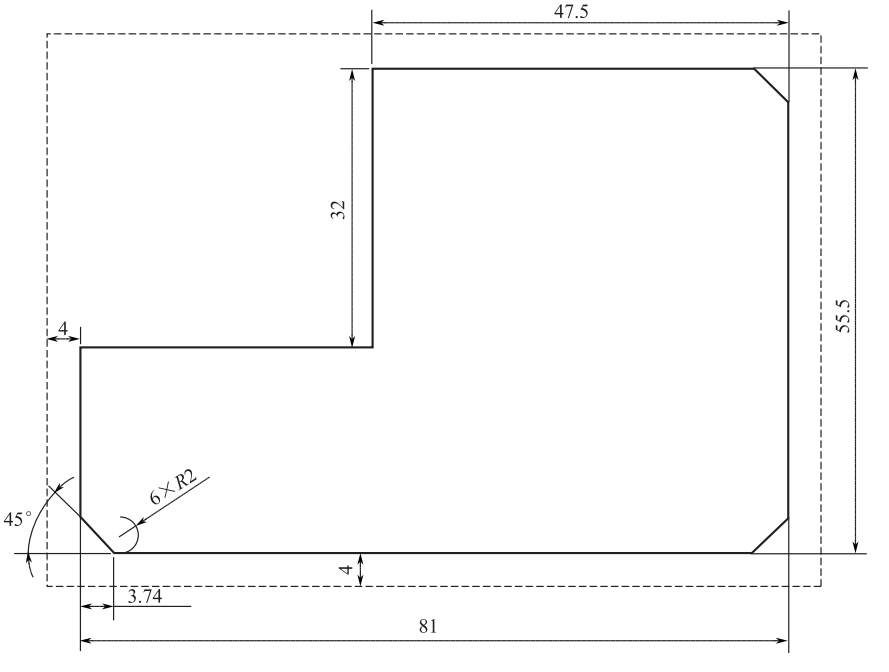


图 2-10-15　草图 1 尺寸

5）创建草图 2。以上步创建的拉伸特征的底面作为基准面，创建图 2-10-17 所示的草图 2。

6）打开“拉伸”命令，选取上步的草图工作为拉伸截面，并设置参数如下：

开始距离：0。

结束距离：12。

布尔运算：求差。

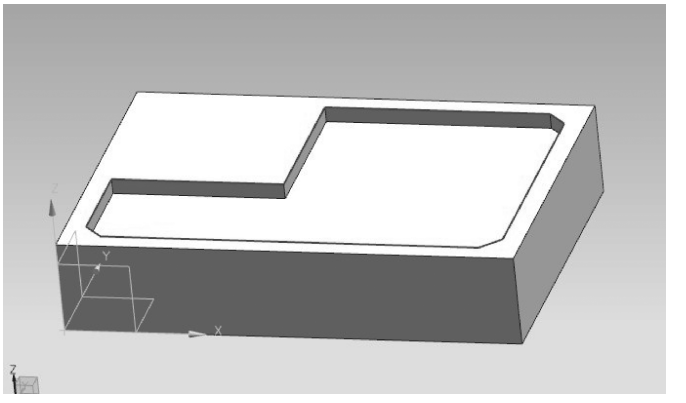


图 2-10-16　拉伸特征 1

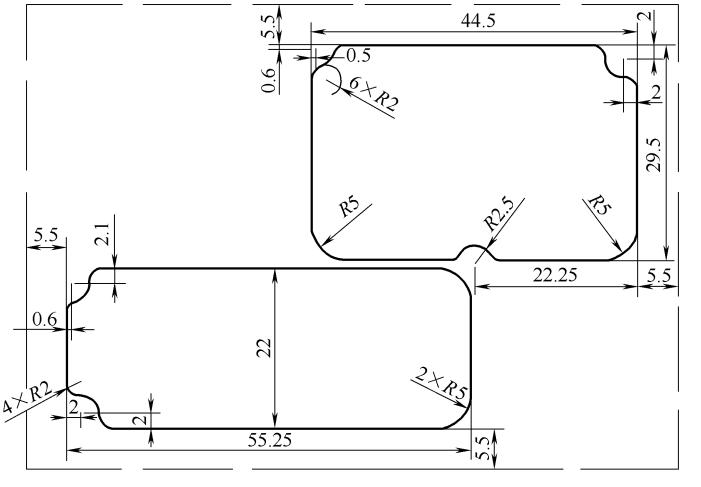


图 2-10-17　草图 2

单击“确定”或者“应用”按钮，创建拉伸特征 2。

7）创建草图 3。

以上步创建的拉伸特征 2 的底面作为基准面，创建图 2-10-18 所示的草图 3。

8）打开“拉伸”命令，选取图 2-10-18 所示的草图 3 作为拉伸截面，并设置拉伸参数如下：

开始距离：0。

结束距离：12。

布尔运算：求和。

单击“确定”或者“应用”按钮，创建拉伸特征 3，如图 2-10-19 所示。

参考图 2-10-20 所示的其他草图尺寸，按照上面的拉伸步骤，将剩下的拉伸特征做出，拉伸完成效果如图 2-10-21 所示。

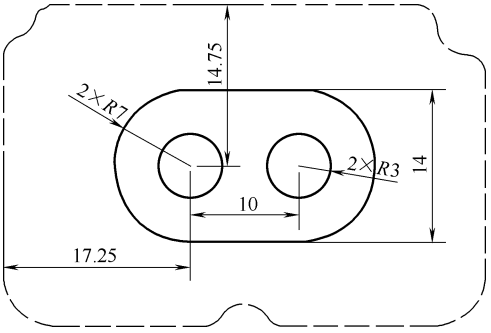


图 2-10-18　草图 3

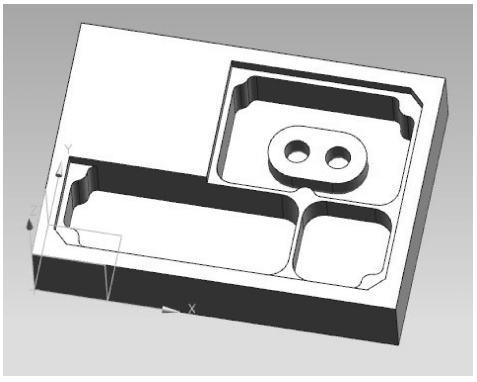


图 2-10-19　拉伸特征 3

三、创建圆角

1. 参数及功能简介

在菜单栏中选择“插入”→“细节特征”→“边倒圆”，弹出“边倒圆”对话框如图 2-10-22 所示。

1）“要倒圆的边”选项组：用于设置固定半径的倒角，既可以多条边一起倒角，也可以手动拖动倒角，改变半径大小，如图 2-10-23 所示。

2）“可变半径点”选项组：用于在一条边上定义不同的点，然后在各点的位置设置不同的倒角效果，如图 2-10-24所示。

3）“拐角回切”选项组：用于在规定的边缘上从一个规定的点回退的距离，产生一个回退的倒角效果，如图 2-10-25 所示。

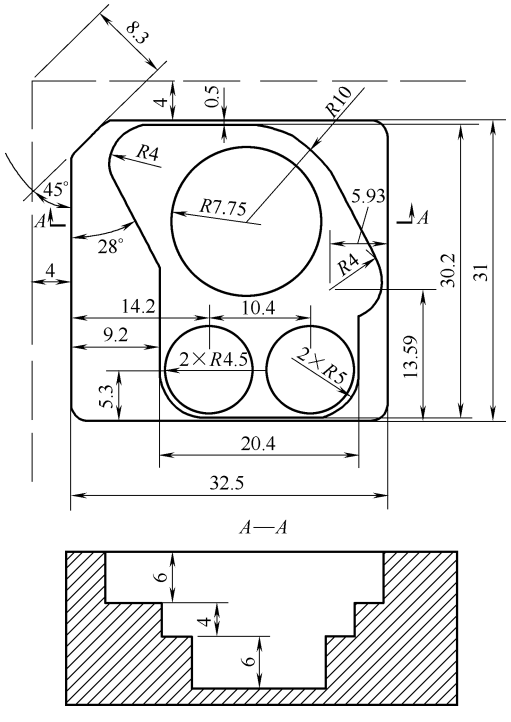


图 2-10-20　其他草图尺寸

4）“拐角突然停止”选项组：用来指定一个点，然后倒角从该点回退一个百分比，回退的区域将保持原状，如图 2-10-26 所示。

5）“溢出解”选项组。

“在光顺边上滚动”：用于设置在溢出区域是否是光滑的。若勾选该复选框，系统将产生与其邻接面相切的倒角面。

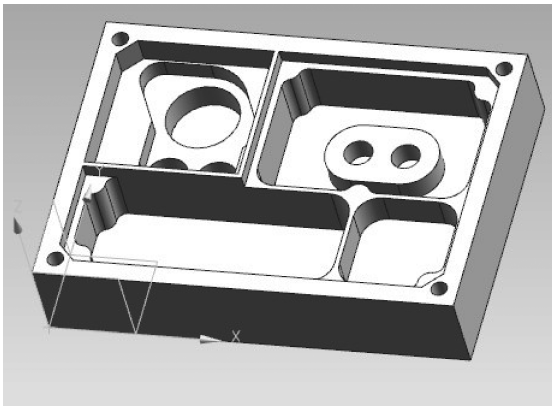


图 2-10-21　拉伸完成效果

图 2-10-22　“边倒圆”对话框

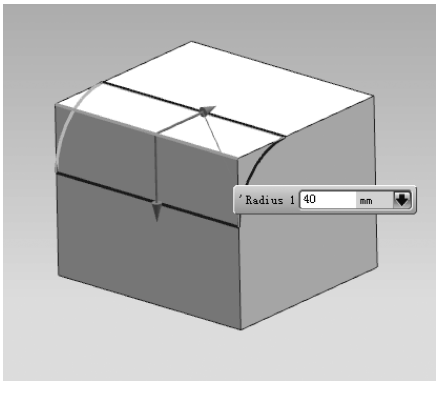


图 2-10-23　固定半径倒角

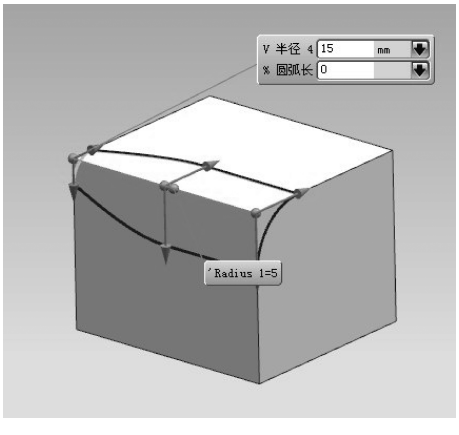


图 2-10-24　可变半径倒角

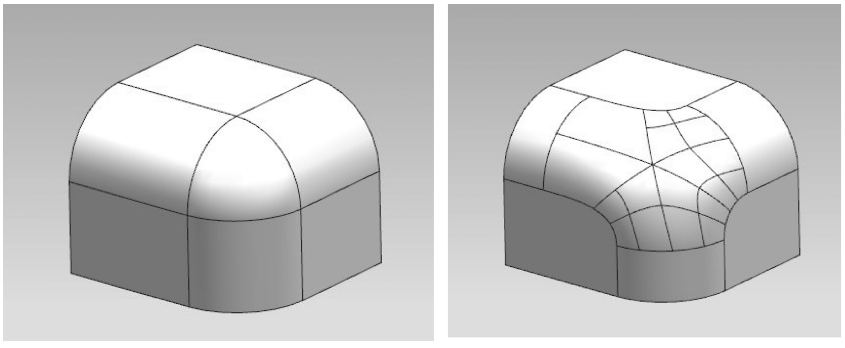
“在边上滚动”：用于设置在溢出区域是否存在陡边。若勾选该复选框，系统将以邻接面的边创建倒角。

“保持圆角并移动锐边”：勾选该复选框，允许倒角在相交的特殊区域生成，并移动不符合几何要求的陡边。

建议在倒圆角操作时，将以上三个溢出方式全部选中。当溢出发生时，系统总会自动地选择溢出方式，使结果最好。

2. 创建圆角特征（恒定半径倒圆）

1）在菜单栏中选择“插入”→“细节特征”→“边倒圆”。



a)　　b)

图 2-10-25　拐角回切

a）未设置拐角回切的情况　b）设置拐角回切的情况

2）选择特征中型腔的竖直直角边。

3）指定倒圆半径：2。

4）设置其他相应选项。

5）单击“确定”或“应用”按钮，创建恒定半径倒圆，如图 2-10-27 所示。

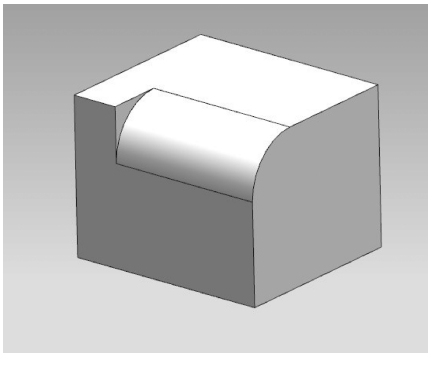


图 2-10-26　拐角突然停止

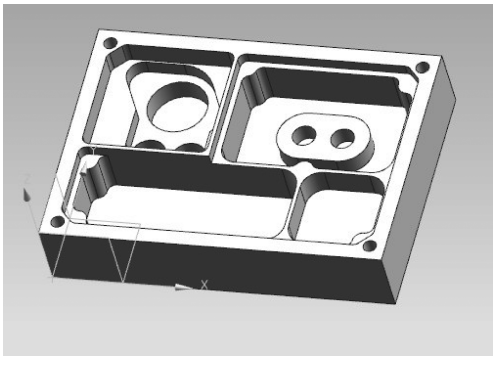


图 2-10-27　恒定半径倒圆

四、创建孔特征

孔特征是用于为一个或多个零件或组件添加钻孔、沉头孔或螺纹孔特征。

1. 参数及功能介绍

在菜单栏中选择“插入”→“设计特征”→“孔”，弹出“孔”对话框如图 2-10-28 所示。

1）“常规孔”选项：创建常规孔。

“位置”选项组：指定孔的位置。可以直接选取已存在的点或通过单击“草图”按钮，在草图中创建点。

“方向”选项组：指定孔的方向。包括“垂直于面”和“沿矢量”。

“形状和尺寸”选项组：确定孔的外形和尺寸。在“成型”下拉列表框中选择孔的外形，包括“简单”“沉头”“埋头孔”和“锥形”四种类型。根据选择的外形，在尺寸中输入孔的尺寸。

图 2-10-28　“孔”对话框

2）“螺钉间隙孔”选项。

“形式和尺寸”：确定孔的外形和尺寸。在“螺钉类型”下拉列表框中选择螺纹形状，系统仅提供了 General Screw Clearance 一种；在“螺钉尺寸”下拉列表框中选择螺纹尺寸，系统提供了从 M1.6 ~ M100 不同尺寸的螺纹尺寸；在“拟合”下拉列表框中选择配合，系统提供了 Close（H12）、Normal（H13）、Loose（H13）和 Custom 四种类型。根据选择的外形，在尺寸中输入孔的尺寸。

3）“螺纹孔”选项。

“螺纹尺寸”：确定螺纹尺寸。在“大小”下拉列表框中选择尺寸型号，系统提供了 M1.6 ~ M200 不同尺寸的螺纹尺寸；在“径向进刀”下拉列表框中选择啮合半径，系统提供了 0.75、Custom 和 0.5 三种；在“螺纹深度”下拉列表框中选择螺纹的长度；在“旋转”选项中选择螺纹是左旋或是右旋。

“尺寸”：根据螺纹尺寸，在“深度”和“顶锥角”文本框中输入尺寸。

4）“孔系列”选项：包括“开始”、“中间”和“结束”三种规格。

2. 创建孔特征的步骤

1）选择孔的类型：常规孔。

2）选择放置面：以长方体上表面为放置面。

3）进入草图绘制界面，确定孔的位置，如图 2-10-29 所示。

4）返回到建模环境，在“孔”对话框中设置孔的参数如下：

成形：简单。

直径：2.13。

深度：9。

锥度：118。

布尔运算：求差。

单击“确定”或“应用”按钮。

依照此步骤分别创建其他放置面上的孔，创建完成后的孔特征如图 2-10-30 所示。

模型创建完成，在建模的过程中，有些步骤是可以调换创建的先后顺序，根据零件的外形尺寸，以及形状特征，判断创建的先后顺序，这样不仅可以节约建模的时间，而且还能降低建模的难度，提高建模的效率。

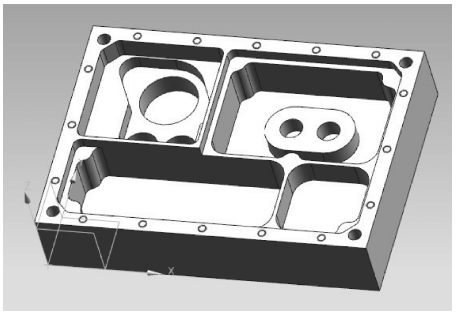


图 2-10-29　孔的位置

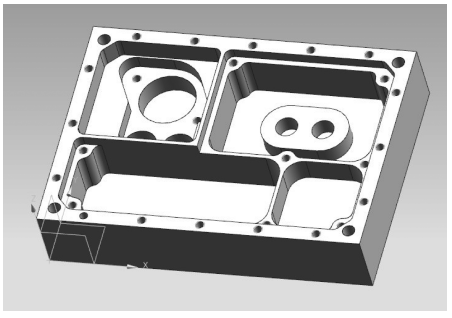


图 2-10-30　创建完成的孔特征

第二节　计算机辅助编程

一、UG NX 加工模块简介

UG NX 提供了强大的实体建模和造型功能，其 CAM 模块可以根据建立的三维模型直接生成数控代码，为机床编程提供了一套完整的解决方案，可以帮助企业使其先进机床的产出最大化。利用 UG NX CAM，可以改善其 NC 编程和加工过程，极大地减少浪费，大幅提高生产力。

UG NX CAM 系统可以提供全面的、易于使用的功能，以解决数控刀轨的生成、加工仿真和加工验证等问题。UG NX CAM 系统所提供的单一制造方案，可以高效率地进行从普通孔到复杂飞机螺旋桨的加工。

UG NX CAM 系统除了提供生成 NC 代码的工具以及后置任务，还提供了在这个领域最新改进的加工切削技术，比如高速切削技术（高速铣）、样条插补以及数字检验确认，这些都能极大地提高用户的生产能力。除传统的功能以外，目前增加的解决方案还包括对加工数据的计划、管理和分配方案。利用行业的最佳实践经验，它提供了一个中枢数据结构，可以在一个企业内甚至在全球范围内的若干加工系统中共享信息。

UG NX CAM 系统提供了范围极广的功能，它不仅可以支持多级化的不同模块选择以满足用户的需要，而且，用户还可以方便地采用不同的配置方案来更好地满足其特定的工业需求，例如：

汽车——UG NX CAM 系统强大的铣削功能对于加工注塑模具、铸造模具和冲压模具以及精加工都极为合适。

航空航天——在航空航天工业中，制造飞机机身和涡轮发动机的零部件都需要多轴加工的能力，UG NX CAM 系统可以很好地满足这些需求。

日用消费品/高科技产品——UG NX CAM 系统可以直接满足日用消费品/高科技产品制造商对注塑模具加工制造的要求。另外，它还支持对小平面几何体（STL 模型）的直接加工，可以帮助用户快速地将原型转化为模具。

通用机械——UG NX CAM 系统为通用机械工业提供了多种专业的解决方案，比如高效率的平面的铣削。针对铸造件及焊接件的精细加工以及大批量的零部件车加工和钻孔加工等。对于通用产品特征的加工可实现高效的自动化。

另外，UG NX CAM 系统还提供兼容多 CAD 系统的功能，可以接受很多不同 CAD 系统产生的几何数据。它支持的 CAD 系统包括 UG、I-deas、Solid Edge、Pro/Engineer、Catia 和 AutoCAD 等主要系统。

1. UG NX CAM 的功能

UG NX CAM 涵盖了完整的 NC 编程和后处理、切削仿真和机床运动模拟功能。此外，其以市场需求为导向的设计和装配软件可以用于构建产品、工装和夹具、刀具，同时也可以创建机床的三维模型供模拟使用。UG NX CAM 的功能示意图如图 2-10-31 所示。

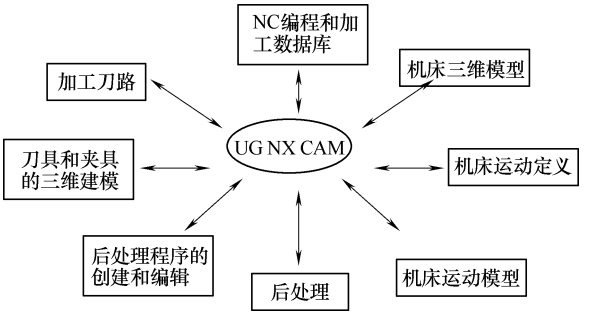


图 2-10-31　UG NX CAM 功能示意图

UG NX 7.0 CAM 模块提供了 2～5 轴的铣削加工，2～4 轴的车削加工，电火花切割加工和点位加工。编程人员可以根据加工零件的结构特征和加工精度要求选择合适的加工方法。同时，在该模块中，可以利用可视化功能，在屏幕上显示刀具轨迹，仿真刀具的真实切削过程，这样可以直观地通过过切检查和残留材料的检查，使加工过程合理化。

2. UG NX CAM 的加工能力及特点

UG NX CAM 强大的加工功能是由多个加工模块所组成的。固定轴铣与可变轴铣模块用于对表面轮廓进行精加工。它们提供了多种驱动方法和走刀方式，可根据零件表面轮廓选择最佳的切削路径和切削方法。在变轴铣中，可对刀具与投射矢量进行灵活地控制，从而满足复杂零件表面轮廓的加工要求，生成多轴机床数控加工程序。还可以控制顺铣和逆铣切削方式，按用户指定的方向进行铣削加工。对于零件中的陡峭区域和前道工序没有切除的区域，系统能自动识别并清理这些区域。

顺序铣模块可连续加工一些连接表面，用于在切削过程中需要精确控制每段刀具路径的场合，可以保证各相接表面光顺过渡。其循环功能可在操作中连续完成零件底面和侧面的加工，可用于加工叶片等复杂曲面。

（1）加工术语和定义　UG NX CAM 铣加工中有一系列的加工术语，理解这些术语对阅读本书和使用 UG NX 软件有着重要的帮助，下面列举一些重要的术语及其定义。

1）模板文件（Template File）。模板文件是指包含刀具、加工方法和操作等相关信息，并能将其复制到其他零件中去的任何一个零件文件。引用模板文件，可以节省操作时间，提高加工效率。

2）操作（Operation）。操作包含所有用于产生刀具路径的信息，如几何体、刀具、

加工方法、切削深度等。创建一个操作相当于产生一个工步。

3）几何体（Geometry）。几何体用于定义加工的零件对象和加工工件，也可以通过指定边界、部件边界、毛坯边界和检查边界来定义几何体。

① 边界（Boundary）。边界是限制刀具运动的直线或曲线，用于定义切削区域。边界可以是封闭的，也可以是开放的。

② 部件边界（Part Boundary）。部件边界用于定义完成的部件对象，用来控制刀具的运动范围或切削范围。

③ 毛坯边界（Blank Boundary）。毛坯边界用于指定被加工零件的材料范围，即原材料。

④ 检查边界（Check Boundary）。检查边界用于指定刀具的避让几何空间，也就是指刀具不能到达的区域，用来避免工件与刀具或是刀柄相碰撞的情况发生。

4）加工坐标系（Machine Coordinate System，MCS）。在 UG NX 7.0 CAM 中使用了四种坐标系，分别为绝对坐标系（ACS）、工作坐标系（WCS）、参考坐标系和加工坐标系（MCS）。加工坐标系的坐标轴用 XM、YM、ZM 表示，是所有后续刀具路径输出点的基准位置，刀具路径中的所有数据都相对于该坐标设定。

5）刀具（Tools）。刀具是指用于切削的工具，常用的切削刀具有铣刀、车刀和钻刀等。

6）刀具位置源文件（Cutter Location Source File，CLSF）。刀具位置源文件是指用来定义一个或多个加工刀具坐标的文件，默认的后缀名为“.cls”。

7）后置处理（Postprocess）。后置处理是在 UG NX 7.0 CAM 生成刀具路径后，根据机床控制器的格式，将标准的刀位文件转换成机床可以执行的 NC 程序。

8）步进（Stepover）。步进是指相邻刀具路径之间的距离，即横向进给率，对于铣削加工是指铣削宽度。

9）材料侧（Material Side）。材料侧是指保留边界哪一侧的材料不被切削。

10）工件（Workpiece）。工件是指包含零件信息和毛坯信息的过程零件。

（2）UG NX CAM 的加工模块及能力　UG NX 7.0 CAM 模块加工的加工类型有铣削加工、车削加工、点位加工和线切割加工四大类型。

铣削加工是最为常见也是最重要的一种加工方式。根据加工表面形状可分为平面铣和轮廓铣。根据在加工过程中机床主轴轴线方向相对工件是否能够改变，可分为固定轴铣和可变轴铣。固定轴铣又可分为平面铣、型腔铣和固定轮廓铣；可变轴铣又可分为可变轴曲面轮廓铣和顺序铣。具体的分类关系如图 2-10-32 所示。

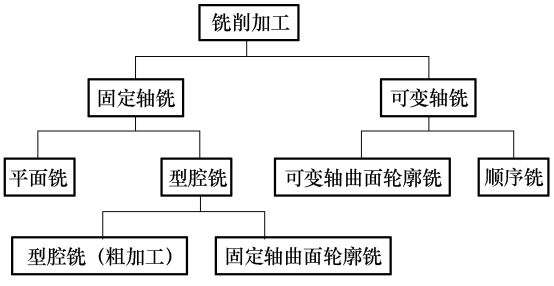


图 2-10-32　铣削加工类型关系示意图

① 平面铣（Mill-Planar）。平面铣用于平面轮廓或平面区域的精、粗加工，刀具

平行于工件底面进行多层铣削。每个切削层均与刀杆垂直，各加工部位的侧壁与底面垂直。平面铣提供加工2～2.5轴零件的所有功能，设计更改通过相关性而自动处理。该模块包括多次走刀轮廓铣、仿型内腔铣和Z字形走刀铣削，用户可规定避开夹具和进行内部移动的安全余量。此外，还提供型腔分层切削功能和凹腔底面小岛加工功能，以及提供一些操纵机床辅助运动的指令，如冷却、刀具补偿和夹紧等。

平面铣的特点是：刀杆固定，底面是平面，各侧壁垂直于底面。

② 型腔铣（Mill-Cavity）。型腔铣根据型腔的形状，将要切除的部位在深度方向上分成多个切削层进行切削。每个切削层可指定不同的切削深度，切削时刀杆与切削平面垂直。型腔可用于加工侧壁与底面不垂直的部位。型腔铣可用边界、平面、曲线和实体定义要切除的材料。

型腔铣模块对加工汽车和消费品工业中普遍使用的注塑模具和冲压模特别有用。它提供粗加工单个或多个型腔、沿任意类似型芯的形状进行粗加工大余量去除的全部功能。其最突出的功能是对非常复杂的形状产生刀具运动轨迹，确定走刀方式。通过容差型腔铣削可加工设计精度低、曲面之间有间隙和重叠的形状，而构成型腔的曲线可达数百个。当该模块发现型面异常时，它可以自行更正，或者在用户规定的公差范围内加工出型腔。

型腔铣的特点是：刀杆固定，底面可以是曲面，侧壁可以不垂直于底面。

③ 固定轴曲面轮廓铣（Fixed-Axis milling）。固定轴曲面轮廓铣简称固定轴铣。它将空间驱动几何体投射到零件表面上，驱动刀具以固定轴形式加工曲面轮廓。固定轴铣主要用于曲面的半精加工和精加工，也可以进行多层铣削。该模块提供完全和综合的功能，用于产生3轴联动加工刀具路径。基本上能造型出来的任何曲面和实体它都能加工。它具有强大的加工区域选择功能，有多种驱动方法和走刀方式可供选择，如沿边界切削、放射状切削、螺旋切削及用户定义方式切削。此外，它还提供逆铣、顺序铣控制以及螺旋进刀方式；还可以容易地识别前道工序未能切除的加工区域和陡峭区域，以便用户进一步清理这些地方。

固定轴铣的特点是：刀杆固定，具有多种切削形式和进刀退刀控制，可投射空间点、曲线、曲面和边界等驱动几何体进行加工，可做螺旋线切削（Spiral Cut）、射线切削（Radial Cut）及清根切削（Flow Cut）。

④ 可变轴轮廓铣（Variable-Axis Milling）。可变轴轮廓铣削模块支持定轴和多轴铣削功能，可加工UG造型模块中生成的任何几何体，并保持主模型相关性。该模块提供完整的3～5轴铣削功能，提供强大的刀杆控制、走刀方式选择和刀具路径生产功能。

⑤ 顺序铣（Sequential-Mill）。顺序铣模块适用于需要完全控制刀具路径生成过程的每一步骤的情况，支持2～5轴的铣削编程。它允许用户交互式的一段一段地生成刀具路径，并保持对过程中的每一步都全面控制。该模块提供的循环功能使用户可以仅定义某个曲面上最内和最外的刀具路径，而由该模块自动生成中间的步骤，适用于高难度的数控程序编制。

二、UG NX CAM 数控加工的一般过程

UG NX CAM 用于产品零件的数控加工，其流程如图 2-10-33 所示，首先是调用加工零件并加载毛坯，调用系统的模板或用户自定义的模板；然后分别创建加工的程序、指定加工几何体、创建刀具、定义加工方法；用户依据加工程序的内容来确定刀具轨迹的生成方式，如加工的切削模式、刀具的步进方式、切削步距、主轴转速、进给量、切削角度、进退刀点、干涉平面及安全平面等详细内容，生成刀具轨迹；对刀具轨迹进行仿真加工后，检测仿真结果是否满足加工要求，通过对操作进行相应的编辑修改、复制等功能以提高编程的效率；待所有的刀具轨迹设计合格后，进行后处理生成相应数控系统的加工代码，进行 NC 传输与数控加工。

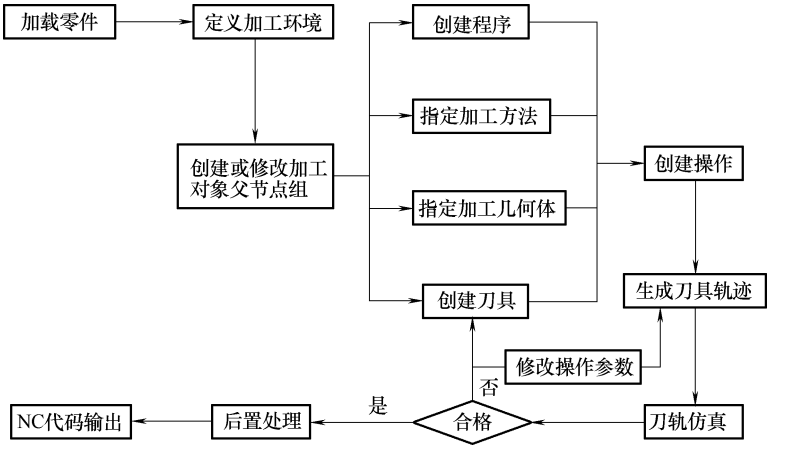


图 2-10-33　UG NX CAM 数控加工流程

1. UG NX 数控加工实例分析

下面将对图 2-10-34 所示的型腔体工件进行数控编程加工，通过下面的学习，将简单了解 UG 数控编程的流程及面铣削和型腔铣削的操作方法。

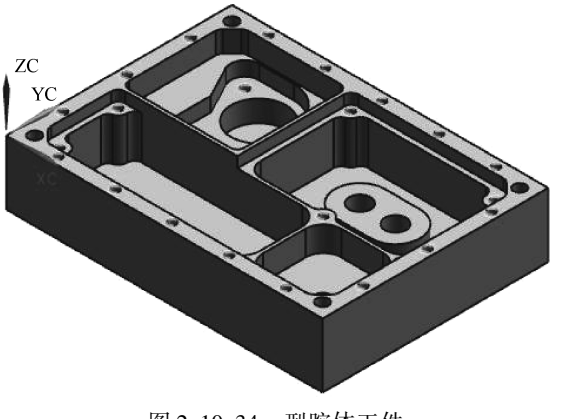


图 2-10-34　型腔体工件

2. 数控编程加工方案

（1）加工坯料及编程原点　加工坯料尺寸及加工原点如图 2-10-35 所示。

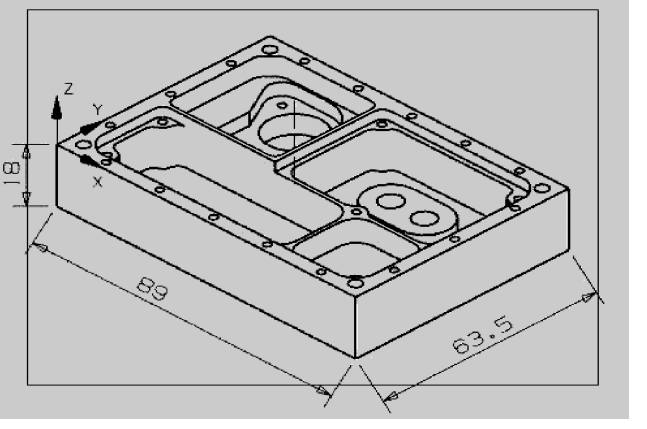


图 2-10-35　加工坯料尺寸及加工原点

（2）加工工艺分析及规划

1）加工工艺规划。

① 整体立铣刀（ϕ8mm）用于对坯料型腔进行粗加工。

② 整体立铣刀（ϕ4mm）对坯料型腔进行半精加工。

③ 钻头（ϕ2.1mm）对坯料进行钻孔加工。

④ 钻头（ϕ3.4mm）对坯料进行钻孔加工。

⑤ 整体立铣刀（ϕ4mm）对坯料用平面铣对底面进行精加工。

⑥ 整体立铣刀（ϕ4mm）对坯料用平面铣对侧面进行精加工。

2）加工工艺分析。

① 对坯料进行粗加工，因坯料加工区域不大，而且拐角 R 不大，选用 ϕ8mm 整体立铣刀，通过型腔铣去除大量材料，部件余量为 0.2mm，底面余量为 0.2mm。

② 对坯料进行半精加工，主要去除拐角处余量，选用 ϕ4mm 整体立铣刀，通过二次型腔铣去除边角余量，部件余量为 0.2mm，底面余量为 0.2mm。

③ 为避免在精加工后钻孔划伤表面，在精加工前进行钻孔加工，选用 ϕ2.1mm 及 ϕ3.4mm 钻头进行钻孔加工。

④ 对坯料底面进行精加工，因为底面有一些狭小的地方，为避免换刀精加工造成底面加工不平，选用 ϕ4mm 整体立铣刀精加工底面，部件余量为 0.3mm，底面余量为 0。

⑤ 对坯料侧面进行精加工，选用 ϕ4mm 整体立铣刀精加工侧面，部件余量为 0，底面余量为 0。

（3）设置安全高度部件几何毛坯

步骤 1：双击桌面 UG NX 7.0 图标进入初始界面。

步骤2：在“打开部件文件”对话框中选择加工部件，单击“OK”按钮打开文件。

步骤3：单击“标准”工具栏的“开始”按钮，选择“加工”选项，弹出“加工环境”对话框，单击“确定”按钮进入加工环境界面。

步骤4：在“操作导航器”工具栏中单击“几何视图”按钮，将操作导航器的显示内容调整为几何体。

步骤5：在导航器中双击“MCS_MILL”选项，弹出“Mill Orient”对话框，如图2-10-36所示。

步骤6：在“安全设置选项”下拉列表框中选择“平面”选项，单击“指定平面”按钮，弹出“平面”对话框，如图2-10-37所示。

图2-10-36 “Mill Orient”对话框

图2-10-37 “平面”对话框

步骤7：设置安全高度（“距离”文本框）。设置各参数如图2-10-37所示，双击“确定”按钮完成安全高度的设置。

步骤8：单击“MCS_MILL”选项中的按钮，再双击“WORKPIECE”选项，弹出“铣削几何体”对话框，如图2-10-38所示。

步骤9：设置部件几何体，在“几何体”选项组中单击按钮，弹出“部件几何体”对话框，如图2-10-39所示，单击“全选”和“确定”按钮设定部件几何体。

步骤10：设置毛坯几何体，在“铣削几何体”对话框中单击按钮，弹出“毛坯几何体”对话框，如图2-10-40所示，在“选择选项”选项组中选择“自动块”单选按钮，单击“确定”按钮设定毛坯几何体。

图2-10-38 “铣削几何体”对话框

图 2-10-39　“部件几何体”对话框

图 2-10-40　“毛坯几何体”对话框

步骤 11：在“铣削几何体”对话框中单击“确定”按钮确认操作。

（4）设定刀具

步骤 1：在“加工创建”工具栏中单击“创建刀具”按钮，弹出“创建刀具”对话框，如图 2-10-41 所示。

步骤 2：在“类型”下拉列表框中选择“mill_planar”选项，在“名称”文本框中输入“D8”，单击“确定”按钮，在弹出的“铣刀－5　参数”对话框中，设定刀具参数如图 2-10-42 所示，单击“确定”按钮设定刀具。

图 2-10-41　“创建刀具”对话框

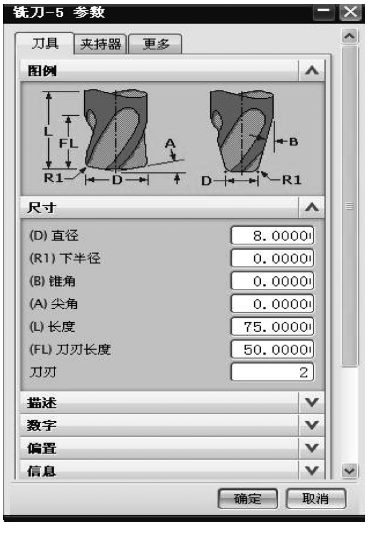


图 2-10-42　设定刀具参数

步骤3：使用相同方法建立名称为“D4”、直径为4mm的立铣刀。

步骤4：在“类型”下拉列表框中选择“drill”选项，在“刀具子类型”选项组中选择“DRILLING_TOOL”类型，在“名称”文本框中输入“drill_D2.1”，单击“确定”按钮，在弹出的“钻刀”对话框中，设定刀具参数如图2-10-43所示，单击“确定”按钮设定刀具。

步骤5：使用相同方法建立名称为“drill_D3.4”、直径为3.4mm的钻头。

（5）创建程序名称

步骤1：在“加工创建”工具栏中单击“创建程序”按钮，弹出“创建程序”对话框，如图2-10-44所示。

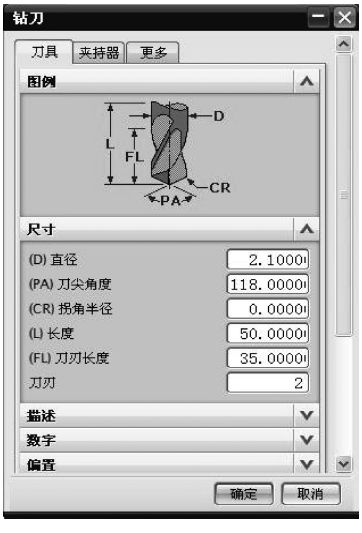


图2-10-43　设定钻头参数

图2-10-44　“创建程序”对话框

步骤2：在“名称”文本框中输入“Q1”作为程序名，单击“应用”按钮，弹出“程序”对话框，如图2-10-45所示，单击“确定”按钮设定程序名。

步骤3：创建“Q2”“Q3”“Q4”“Q5”“Q6”“Q7”“Q8”程序名。

图2-10-45　“程序”对话框

（6）创建加工程序

步骤1：在“加工创建”工具栏中单击“创建操作”按钮，弹出“创建操作”对话框，设置创建操作选项和参数如图2-10-46所示。

步骤2：单击“确认”按钮，弹出“型腔铣”对话框，如图2-10-47所示。

图 2-10-46　“创建操作”对话框

图 2-10-47　“型腔铣”对话框

步骤 3：设置刀轨。单击“刀轨设置”选项组，按图 2-10-48 所示输入相应的参数。

步骤 4：单击“刀轨设置”选项组下的“切削参数”按钮，弹出“切削参数”对话框，如图 2-10-49 所示。

图 2-10-48　“刀轨设置”选项组

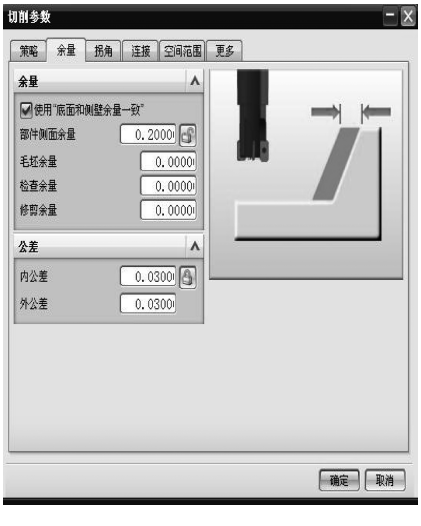


图 2-10-49　“余量”选项卡

步骤 5：在“切削参数”对话框中选择“余量”标签，按图 2-10-49 的“余量”选项卡所示输入参数。

步骤 6：在“切削参数”对话框中选择“空间范围”标签，按图 2-10-50 的“空间范围”选项卡所示，选择“处理中的工件”下拉列表框中选择“使用 3D”选项。

步骤 7：单击“确定”按钮退出“切削参数”对话框，返回“型腔铣”对话框。

步骤 8：单击“刀轨设置”选项组下的“非切削移动”按钮，弹出“非切削移动”对话框，如图 2-10-51 所示。

步骤 9：在“非切削移动”对话框中选择“进刀”选项卡，按图 2-10-51 所示输入参数。

图 2-10-50 “空间范围”选项卡

步骤 10：在“非切削移动”对话框中选择“传达/快递”选项卡，按图 2-10-52 所示输入参数。

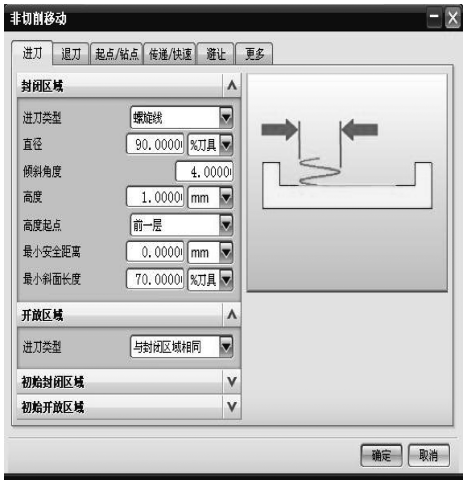


图 2-10-51 “进刀”选项卡

图 2-10-52 “传达/快递”选项卡

步骤 11：单击“确定”按钮退出“非切削移动”对话框，返回“型腔铣”对话框。

步骤 12：单击“刀轨设置”选项组下的“进给率及速度”按钮，弹出“进给率和速度”对话框，如图 2-10-53 所示，按图 2-10-53 所示设置主轴转数和进给率。单击“确定”按钮返回“型腔铣”对话框。

步骤 13：在“操作”选项组中单击“生成”按钮，生成铣削刀具路径。如图 2-10-54 所示。

图 2-10-53　“进给率和速度”对话框

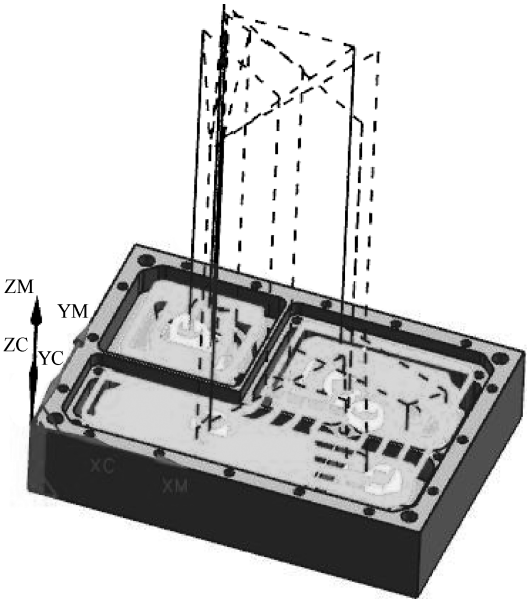


图 2-10-54　生成铣削刀具路径

步骤 14：单击“确定”按钮退出型腔铣操作。

（7）实体仿真验证

步骤 1：在操作导航器中选择 Q1-1 刀具路径并双击，在打开的“型腔铣”对话框中的“操作”选项组中单击“确认”按钮，弹出“刀轨可视化”对话框，如图 2-10-55 所示。

步骤 2：选择“2D 动态”选项卡，单击“播放”按钮▶，系统提示正在预处理几何体，以用于定位，然后进行模拟实体仿真，结果如图 2-10-56 所示。

步骤 3：仿真加工完成后，单击“比较”和“显示”按钮进行对比，然后单击“确定”按钮退出可视化操作。

（8）创建半精加工程序

步骤 1：在操作导航器中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“程序顺序视图”选项，将操作导航器的显示内容调整为“程序顺序”。

步骤 2：在 Q1-1 刀具路径上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“复制”选项，在 Q2

图 2-10-55　“刀轨可视化”对话框

程序组上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“内部粘贴”选项，将 Q1-1 刀具路径复制到 Q2 程序组，修改刀具路径名为 Q2-1，如图 2-10-57 所示。

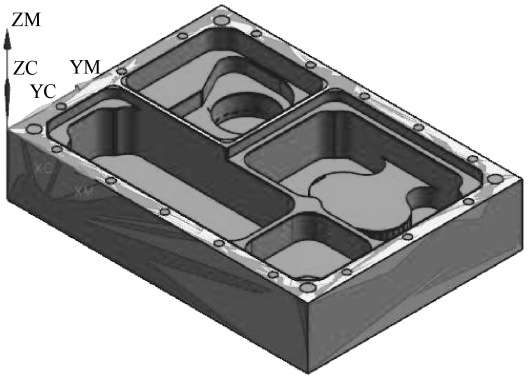


图 2-10-56　模拟实体仿真

图 2-10-57　复制程序操作

步骤 3：双击 Q2-1 刀具路径进行参数及选项编辑。

步骤 4：修改“型腔铣”对话框中的“刀具”及“刀轨设置”选项组中的选项，如图 2-10-58 所示。

步骤 5：单击“刀轨设置”选项组下的“非切削移动”按钮，弹出“非切削移动”对话框，如图 2-10-59 所示。

图 2-10-58　刀具编辑

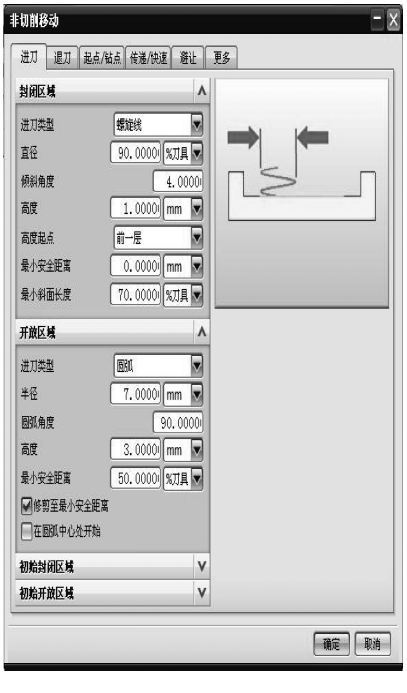


图 2-10-59　“非切削移动”对话框参数设置

步骤 6：在“非切削移动”对话框中选择“进刀”选项卡，按图 2-10-59 所示输入参数。

步骤 7：单击“刀轨设置”选项组下的“进给率及速度”按钮，弹出“进给率和速度”对话框，如图 2-10-60 所示，按图 2-10-60 所示设置主轴转数和进给率。单击“确定”按钮返回“型腔铣”对话框。

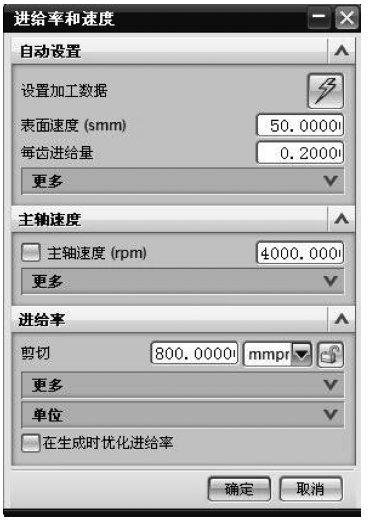


图 2-10-60　“进给率和速度”对话框

步骤 8：在“操作”选项组中单击“生成”按钮生成铣削刀具路径。

步骤 9：单击“确定”按钮退出型腔铣操作。

（9）实体仿真验证

步骤 1：在操作导航器中选择 Q2-1 刀具路径并双击，在打开的“型腔铣”对话框中的“操作”选项组中选择“确认”按钮，弹出“刀轨可视化”对话框。

步骤 2：选择“2D 动态”选项卡，单击“播放”按钮，系统提示正在预处理几何体，以用于定位，然后进行模拟实体仿真，结果如图 2-10-61 所示。

步骤 3：仿真加工完成后，单击“比较”和“显示”按钮进行对比，然后单击“确定”按钮退出可视化操作。

（10）创建钻孔程序

步骤 1：在“加工创建”工具栏中单击“创建操作”按钮，弹出“创建操作”对话框，设置创建操作选项和参数如图 2-10-62 所示。

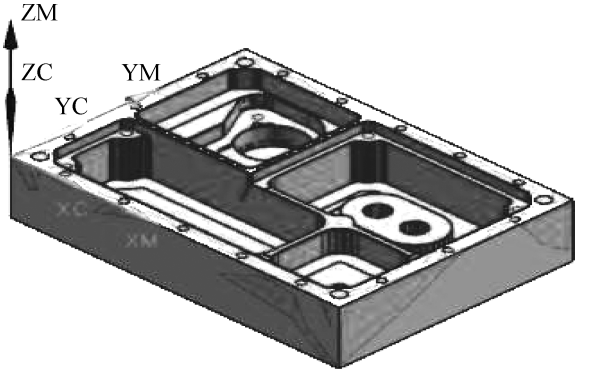


图 2-10-61　实体仿真结果

图 2-10-62　“创建操作”对话框

步骤 2：单击“确定”按钮，弹出“钻”对话框，如图 2-10-63 所示。

步骤 3：在“几何体”选项组中，单击“指定孔”按钮，打开“点到点几何体”对话框，如图 2-10-64 所示。

图 2-10-63 “钻”对话框

图2-10-64 “点到点几何体”对话框

步骤 4：在“点到点几何体”对话框中单击“选择”选项，则出现图 2-10-65 所示的“选择”对话框。

步骤 5：在“选择”对话框中单击“一般点”选项，则出现图 2-10-66 所示的“点”对话框。

图 2-10-65 “选择”对话框

图 2-10-66 “点”对话框

步骤 6：分别选择四个 ϕ3.4mm 孔中心后，单击“确定”按钮返回图 2-10-65 所示的“选择”对话框，再单击“确定”按钮返回“点到点几何体”对话框，再次单击“确定”按钮返回到图 2-10-63 所示的“钻孔”对话框，完成选孔工作。

图 2-10-67　“顶面”对话框

步骤 7：在“几何体”选项组中，单击“指定顶面”按钮，则“顶面”对话框打开，如图 2-10-67 所示，选择 ϕ3.4mm 孔所在的上平面后，单击“确定”按钮后返回。

步骤 8：在“几何体”选项组中，单击“指定底面”按钮，则“底面”对话框打开，如图 2-10-68 所示，选择 ϕ3.4mm 孔所在的上平面后，输入“-20”，如图 2-10-69 所示，单击“确定”按钮后返回。

图 2-10-68　“底面”对话框

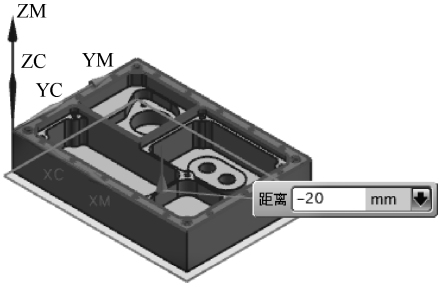


图 2-10-69　指定面操作

步骤 9：在“刀轨设置”选项组中，单击“进给率及速度”按钮，则“进给率及速度”对话框打开，如图 2-10-70 所示，按图示输入数据后单击“确定”按钮后返回。

步骤 10：在“循环类型”选项组中，单击“编辑参数”按钮，则“指定参数组”对话框打开，如图 2-10-71 所示，然后单击“确定”进入“Cycle 参数”对话框，如图 2-10-72 所示，单击“Depth 模型深度”选项后进入“Cycle 深度”对话框，如图 2-10-73 所示，选择“至底面”选项后一直单击“确定”返回“钻”对话框。

图 2-10-70　“进给率和速度”对话框

图 2-10-71　“指定参数组”对话框

图 2-10-72 “Cycle 参数”对话框

图 2-10-73 “Cycle 深度”对话框

步骤 11：在“操作”选项组中单击“生成”按钮，生成钻削刀具路径，如图 2-10-74 所示。

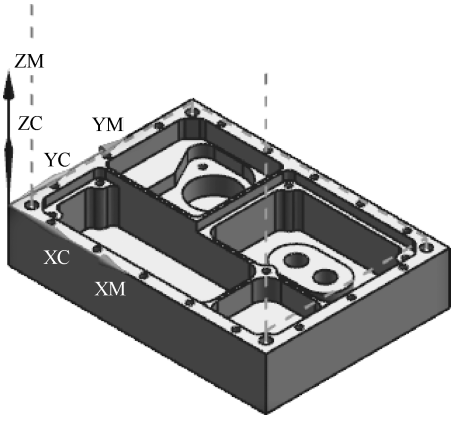


图 2-10-74 钻削刀具路径

其他 ϕ2.1mm 孔根据所在孔的平面分组加工，采用复制程序的方法实现，重新选择孔位、顶面、底面，加工效果如图 2-10-75 所示。

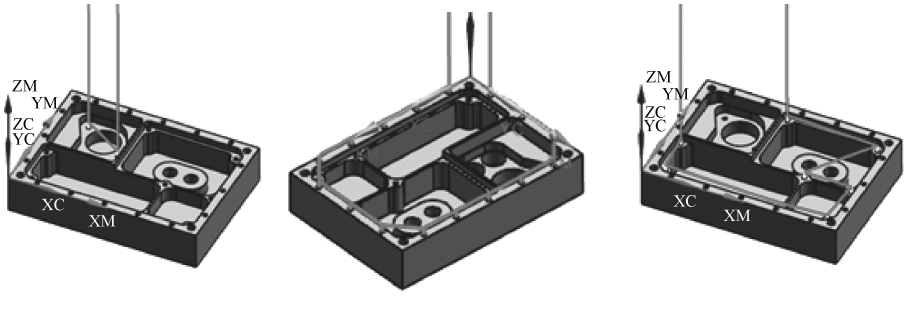


图 2-10-75 其他钻削刀具路径

（11）创建底面精加工程序

步骤 1：在“加工创建”工具栏中单击“创建操作”按钮，弹出“创建操作”对话框，设置创建操作选项和参数如图 2-10-76 所示。

步骤 2：单击“确定”按钮，弹出“面铣”对话框，如图 2-10-77 所示。

图 2-10-76　“创建操作”对话框

图 2-10-77　“面铣”对话框

步骤 3：在“几何体”选项组中，单击“指定面边界”按钮，则“指定面几何体”对话框打开，如图 2-10-78 所示，单击所有所需加工的底面后，如图 2-10-79 所示，单击“确定”按钮后返回。

图 2-10-78　“指定面几何体”对话框

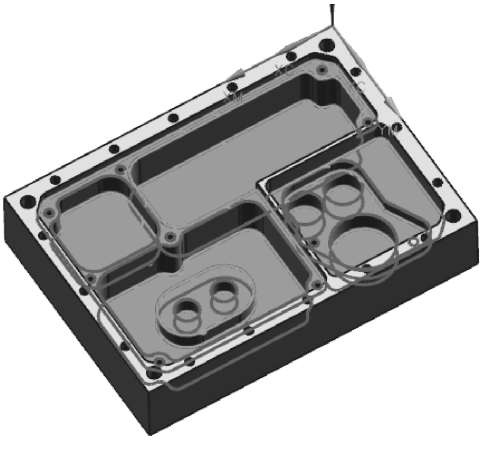


图 2-10-79　选择加工底面

步骤 4：在“刀轨设置”选项组的“切削模式”下拉列表框中选择“跟随周边”选项，如图 2-10-80 所示。

步骤 5：在“刀轨设置”选项组中单击“切削参数”按钮，进入“切屑参数”对话框，在“余量”选项卡中按图 2-10-81 所示设置参数，按“确定”按钮后返回。

图 2-10-80 “刀轨设置”选项组

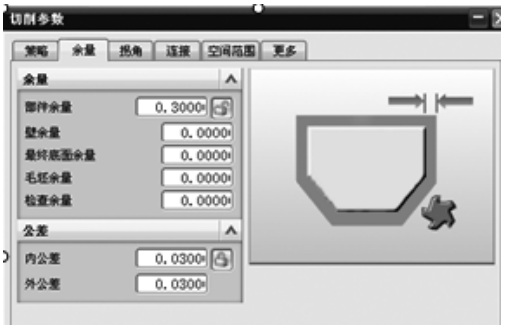


图 2-10-81 “余量”选项卡

步骤 6：单击“刀轨设置”选项组下 的“进给率及速度”按钮，弹出“进给率和速度”对话框，如图 2-10-82 所示，按图示设置主轴转数和进给率。单击“确定”按钮后返回。

步骤 7：在“操作”选项组中单击“生成”按钮，生成铣削刀具路径，如图 2-10-83 所示。

步骤 8：单击“确定”按钮退出面铣操作。

图 2-10-82 “进给率和速度”对话框设置

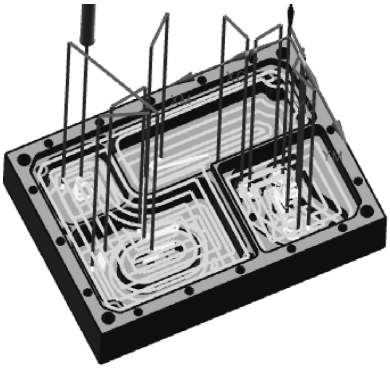


图 2-10-83 铣削刀具路径

（12）创建侧面精加工程序

步骤 1：在操作导航器中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“程序顺序视

图”选项，将操作导航器的显示内容调整为“程序顺序”。

步骤 2：在 Q7-1 刀具路径上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“复制”选项，在 Q7 程序组上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“内部粘贴”选项，将 Q7-1 刀具路径复制到 Q8 程序组，修改刀具路径名为“Q8-1”，如图 2-10-84 所示。

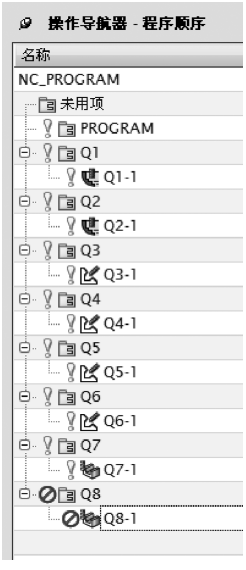


图 2-10-84　复制操作

步骤 3：双击 Q8-1 刀具路径进行参数及选项编辑。

步骤 4：修改“面铣”对话框中的“刀轨设置”选项组中的选项，如图 2-10-85 所示。

步骤 5：单击“刀轨设置”选项组中的“切削参数”按钮，弹出“切削参数”对话框，如图 2-10-86 所示。

步骤 6：在“切削参数”对话框中选择“余量”选项卡，按图 2-10-86 所示输入参数后，按“确定”按钮后返回。

步骤 7：在“操作”选项组中单击“生成”按钮，生成铣削刀具路径，如图 2-10-87 所示。

步骤 8：单击“确定”按钮退出面铣操作。

（13）生成 NC 程序

步骤 1：在操作导航器中选择 Q1 程序组，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“后处理”选项，弹出“后处理”对话框。

步骤 2：根据选择后处理器类型后，确定输出文件的路径及文件名，选择输出 NC 程序的单位，如图 2-10-88 所示，单击“确定”按钮产生 NC 程序，并出现 NC 程序的“信息”对话框。

步骤 3：使用相同方法产生 Q2、Q3、Q4、Q5、Q6、Q7、Q8 程序组的 NC 程序。

图 2-10-85　“刀轨设置”选项组

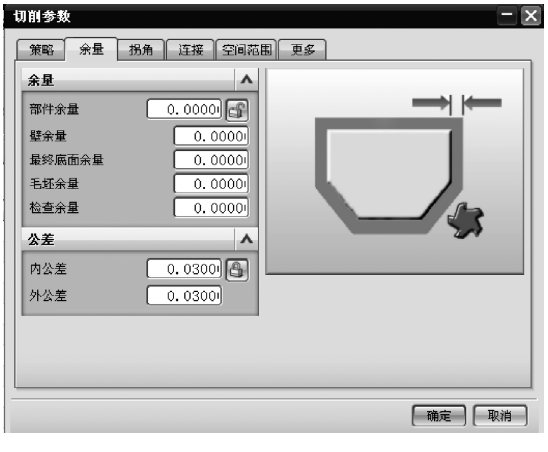


图 2-10-86　“余量”选项卡

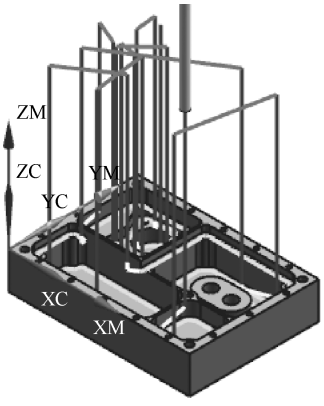


图 2-10-87　铣削刀具路径

图 2-10-88　“后处理”对话框

第三节　后　处　理

一、后处理概述

1. 后处理简介

利用 NX 软件进行零件的数控加工程序的编制时，首先是利用 NX 软件创建加工程序的加工刀位轨迹，这些刀轨通常包含了刀尖点的点位数据（GOTO 点）以及其他一些控制信息，用来控制加工刀具相对于被加工零件的运动。但是，由于实际加工零件的机床具有不同的机床结构（如 3 轴、4 轴加工中心，5 轴双转台、5 轴双摆头、5 轴摆头加转台加工中心等），具有不同的控制系统（如 FANUC、Siemens、Heidenhain 等），使得通过 NX 创建的加工刀轨不能直接传递到机床用于零件的加工。

为了满足零件的实际加工，需要按照机床的结构特点及其控制系统的要求，将通过 NX 软件创建的加工刀轨经过转换，生成符合机床要求的加工代码，这一转换过程就称为后置处理。后置处理的两个关键要素：

加工刀轨——NX 内部刀轨，即通过 NX 软件创建的加工操作。

后置处理器——针对一特定机床结构及控制系统的计算机程序，在进行后置处理时将按照该后置处理器的规定对加工刀轨进行读取和转换，并按照要求的格式进行输出。

2. NX 后置处理

NX 软件将通过 NX/Post 工具，以 NX 加工刀轨作为输入，按照后置处理的规定，输出加工机床控制系统能够识别的 NC/CNC 代码。

NX/Post 系统结构如图 2-10-89 所示。

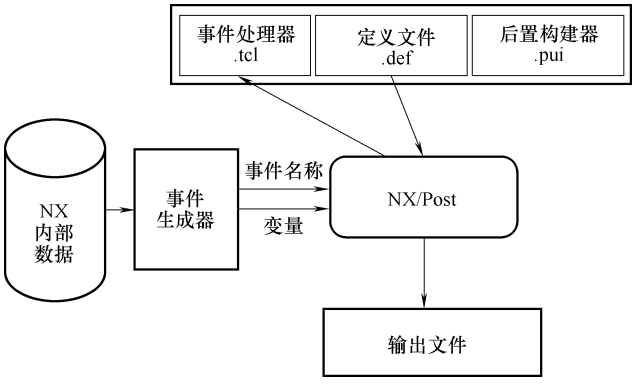


图 2-10-89　NX/Post 系统结构

在进行后置处理时，事件生成器将从 NX 内部数据中提取数据，并转换成相应的事件名称及变量，传递给 NX/Post，NX/Post 将按照事件处理器的规定对事件进行处理，并按定义文件定义的格式进行输出，得到满足机床需要的输出文件。图 2-10-90 所示为直线运动指令的后置处理过程：首先事件生成器读取刀位数据“GOTO/100，50，75”，将该事件名 Linear_Move 和变量 X = 100、Y = 50、Z = 75 传递给 NX/Post，NX/Post 根据事件处理器中规定的 MOM_linear_move 对该事件进行处理，输出的结果根据定义文件中的 BLOCK_TEMPLATE Linear 规定的格式输出，最终得到的结果就是“G01　X100　Y50　Z75”。

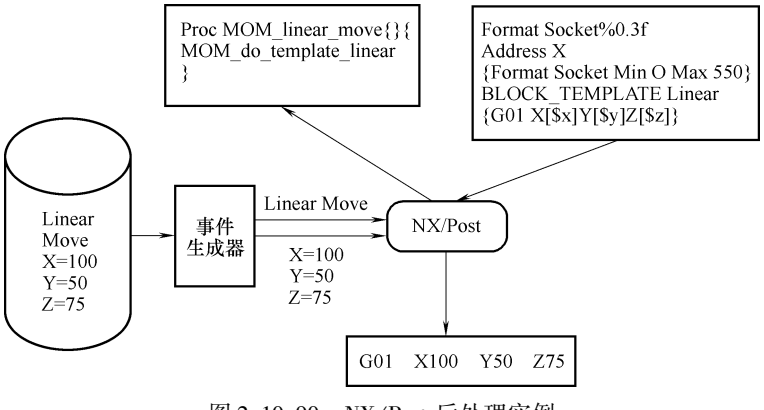


图 2-10-90　NX/Post 后处理实例

NX/Post 后置处理由以下部分组成：

1）事件生成器——在进行后置处理时，将事件和变量传递给 NX/Post 进行处理。

2）事件处理器——是一个通过 TCL 语言编写的包含一组特定指令的文件，该文件定义了各种事件的处理方式。

3）定义文件——是一个包含机床指令格式信息的文件。

4）输出文件——通过 NX/Post 创建的机床能识别加工的指令代码文件。

事件生成器、事件处理器、定义文件是相互独立的，它们一起进行工作，将 NX 内部的刀轨转换成特定机床能识别和执行的加工指令代码文件。其中事件处理器与定义文件一起构成了针对特定机床的后置处理器。

3. 后置处理构建器

后置处理中需要用户定义的是针对特定机床的事件处理器和定义文件，它们可通过后置处理构建器 Post Builder 进行创建。Post Builder 可以非常方便地创建各种机床和控制系统的后置处理器，包括：

1）3 轴铣削加工中心。

2）3 轴车铣加工中心。

3）多轴车铣加工中心。

4）5 轴各种结构铣削加工中心。

5）车床。

6）电火花线切割机床。

二、用 NX/Post Builder 创建后处理

1. Post Builder 简介

Post Builder 是一个非常方便地创建和修改后处理的工具，通过 Post Builder 图形界面，用户可以用交互方式来灵活定义建立 NC 程序的格式和输出内容，以及程序头尾、操作头尾、换刀、循环等每一个事件的处理方式。

利用 Post Builder 建立后处理系统会产生 3 个文件，一个是事件定义文件（.def），包含了指定机床控制系统的静态信息和程序格式；一个事件处理文件（.tcl），定义了每一个事件的处理方式；还有一个是后处理用户界面文件（.pui），用户通过它可利用 Post Builder 来修改事件处理和事件定义文件，并可进行客户化处理。利用 Post Builder 建立后处理文件的过程如图 2-10-91 所示。

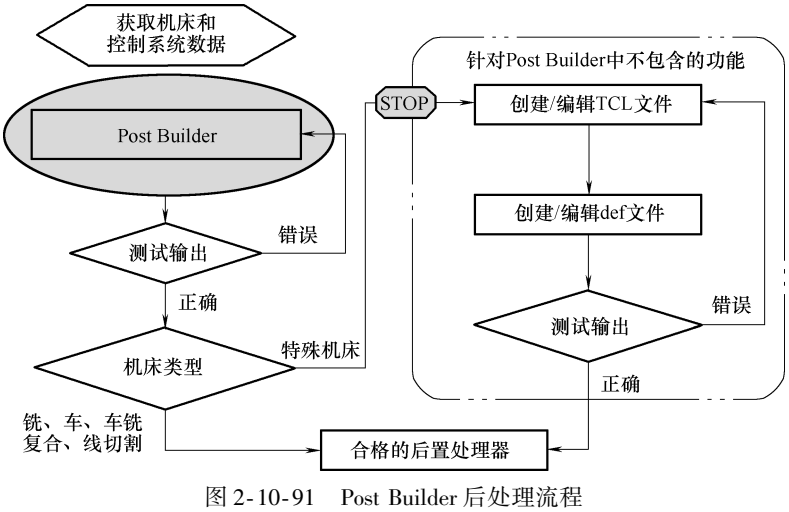


图 2-10-91　Post Builder 后处理流程

2. Post Builder 界面和工具条

选择“Start”→“Programs”→“Unigraphics”→“Post Tools”→“Post Builder”选项，即可以启动 Post Builder，如图 2-10-92 所示。

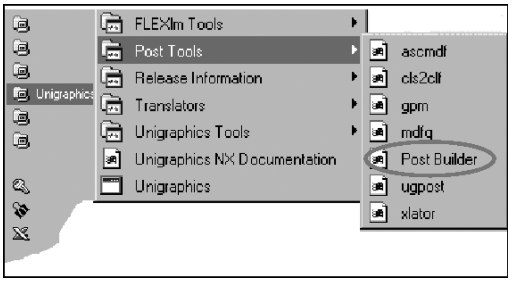


图 2-10-92　启动 Post Builder

当初次启动 Post Builder 时，在其工作界面中可以看到菜单栏、工具条以及提示栏，如图 2-10-93 所示。

图 2-10-93　Post Builder 工作界面

（1）提示栏及工具条

1）提示栏：显示当前操作说明和下一步操作提示，如图 2-10-93 中①所示。

2）文档工具条：由 3 个命令组成，即新建、打开和保存后处理，如图 2-10-93 中②所示。

3）帮助工具条：由三个命令图标组成，可提供不同的帮助选项，如图 2-10-93 中③所示。

（2）菜单栏

1）“File”（文件）：单击“File”选项，打开的下拉菜单中包括“New”（新建）、“Open”（打开）、“Save”（保存）、“Save As”（另存为）、“Close”（关闭）、“Exit”（退出）、“Recently Opened Posts”（最近打开过的文件）等选项。

2）“Options”（选项）：单击“Options”选项，打开的下拉菜单中包括了可用来检查用户自定义命令中语法、字地址、程序行和格式是否正确，以及可以设定文件备份方式等命令。

3）“Utilities”（实用工具）：单击“Utilities”选项，打开的下拉菜单中包括了“Edit Template Posts Data File”（用户直接编辑后处理模板文件）和“Browse MOM Vari-

ables”（浏览 MOM 变量工具）两个选项。

三、创建 3 轴铣削加工中心后处理

本节提供一个利用 Post Builder 建立一个简单的 3 轴铣削加工中心后处理的实例，通过这个实例，可以简单学习和掌握 Post Builder 建立 、调试后处理的方法。

步骤 1：建立 3 轴加工中心后处理。

在“Post Builder”菜单栏选择“File”→“NEW”选项，弹出如图 2-10-94 所示的“Create New Post Processor”对话框。

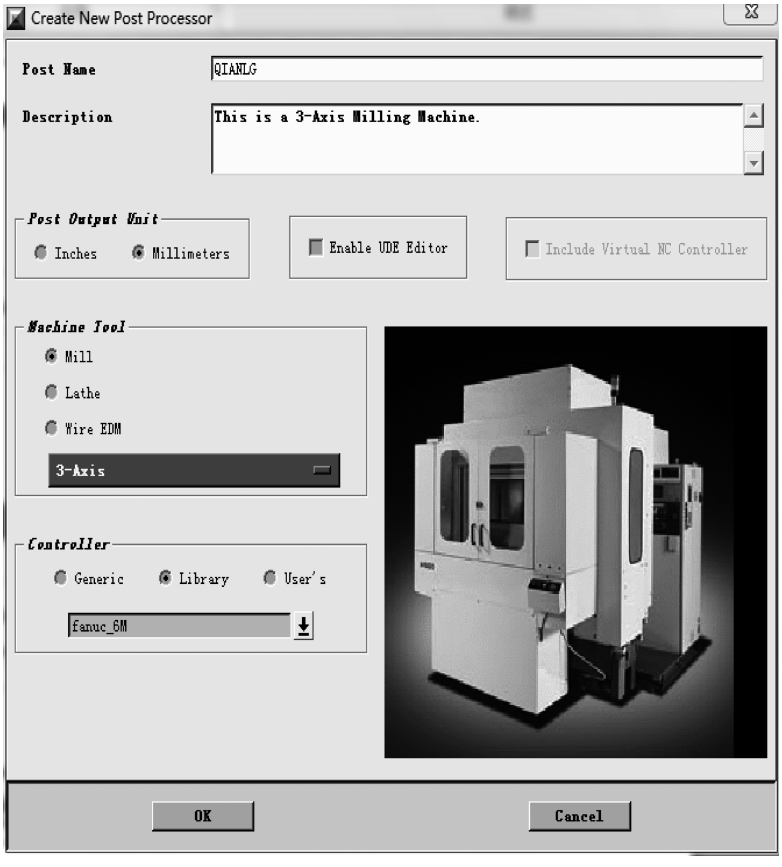


图 2-10-94 “Create New Post Processor”（建立新的后处理）对话框

“Post Name”：输入后处理的文件名，如：QIANLG。

“Post Output Unit”：选中“Millimeters”单选按钮。

“Machine Tool”：选中“Mill”单选按钮，默认选择“3-Axis”。

“Controller”：选中“Library”单选按钮，并在下面的下拉列表框中选择“fanuc_6M”，然后单击“OK”按钮。

选择“File”→“Save”选项，保存后处理文件。

步骤 2：设定加工中心参数，如图 2-10-95 所示。

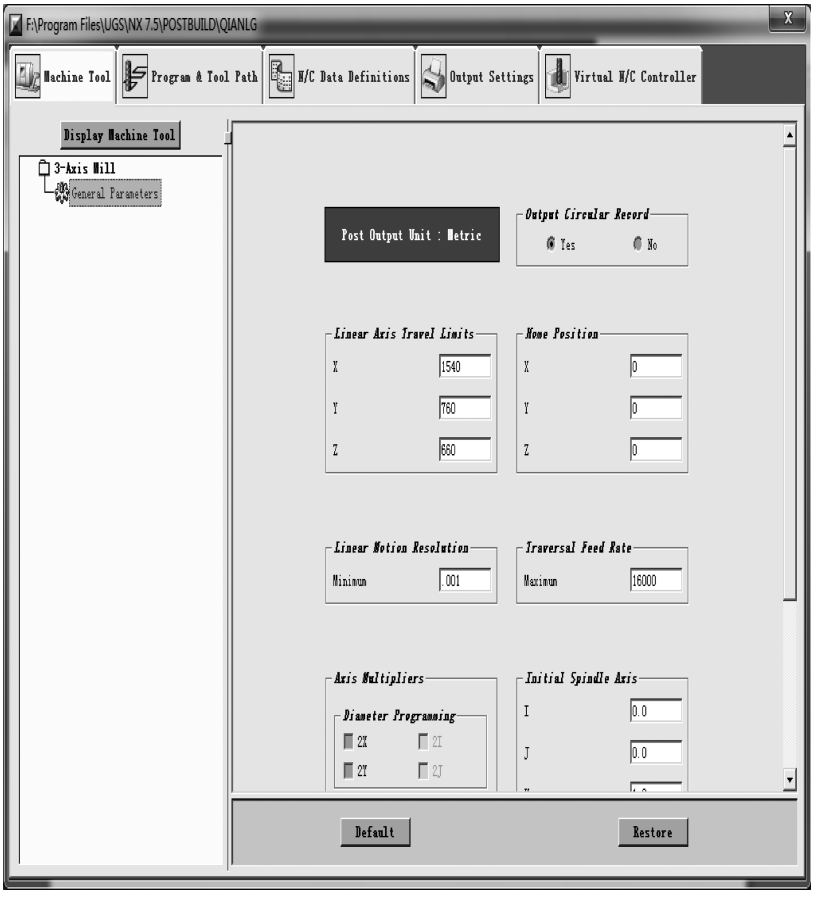


图 2-10-95　设定加工中心参数

1）单击“Display Machine Tool”按钮，显示出 3 轴加工中心简图，如图 2-10-96 所示。

2）单击“Close”按钮退出。

3）将机床行程极限设置为 X = 1540、Y = 760、Z = 660。

4）将“Traversal Feed Rate Maximum”设置为 16000。

步骤 3：定制 NC 程序初始处的格式。

1）在“Post Builder”编辑界面中选择“Program & Tool Path”→“Program”子选项卡，如图 2-10-97 所示。

2）在右侧树形结构窗口中选择“Program Start Sequence”选项。

3）右键单击“Mom_set_seq_on”选项，在弹出的菜单中选择“Delete”选项，如图 2-10-98 所示。

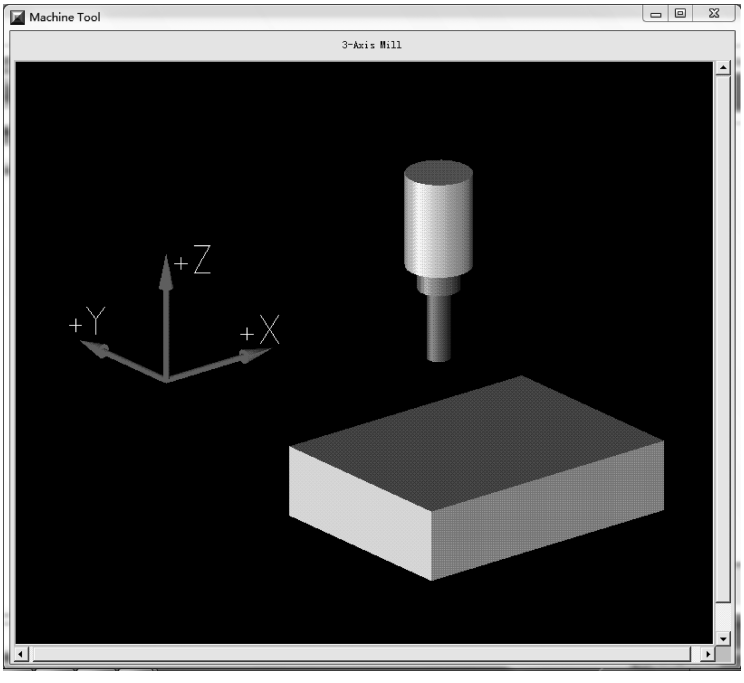


图 2-10-96　3 轴加工中心简图

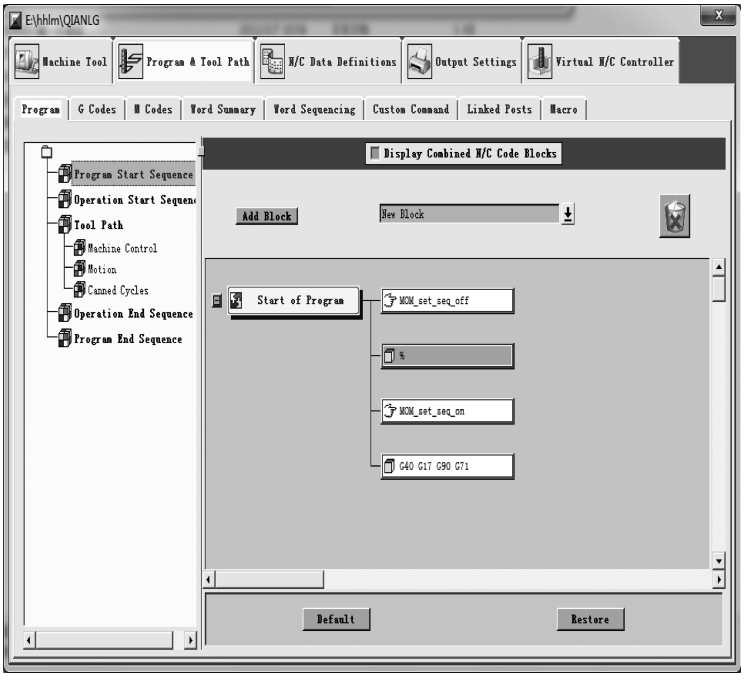


图 2-10-97　“Program”子选项卡

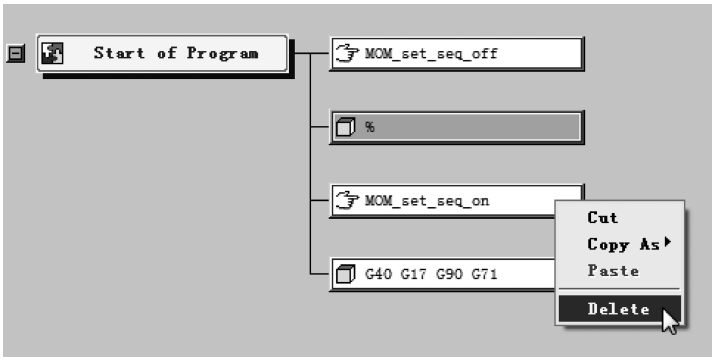


图 2-10-98　删除“Mom_set_seq_on”

4）单击“G40 G17 G90 G71”选项，在弹出的对话框中将“G71”拖到回收桶删除，如图 2-10-99 所示。

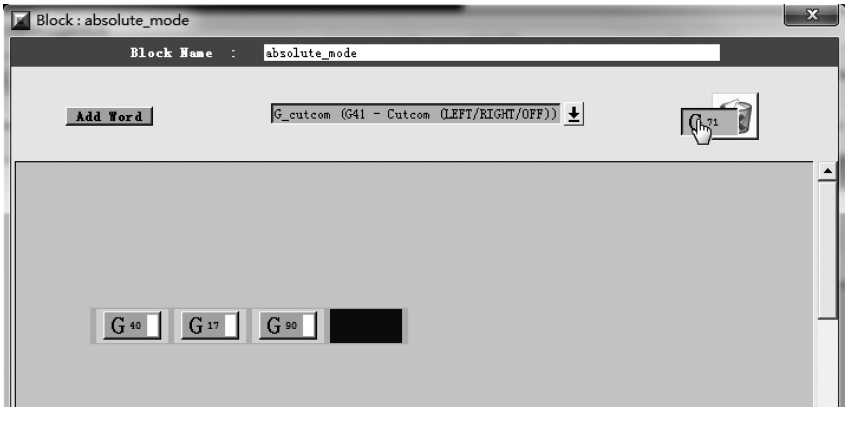


图 2-10-99　删除字“G71”

5）在上方的下拉列表中加入以下选项。

① 选择“G_adjust”→“G49-Cancel Tool Len Adjust”，如图 2-10-100 所示。左键按住“Add Word”拖动到下方空白处，将选项加入，如图 2-10-101 所示。

② 选择“G_motion”→“G80”加入。

③ 选择“G”→“G-MCS Fixture offset”加入。

6）右键单击“G49”，选择“Force Output”选项。

7）右键单击“G80”，选择“Force Output”选项。

8）右键单击“G”，选择“Optional”选项。

9）单击“OK”按钮，如图 2-10-102 所示，返回主界面。

步骤 4：定制操作起始处的格式。

1）在左侧树形结构窗中选择“Operation Start Sequence”选项。

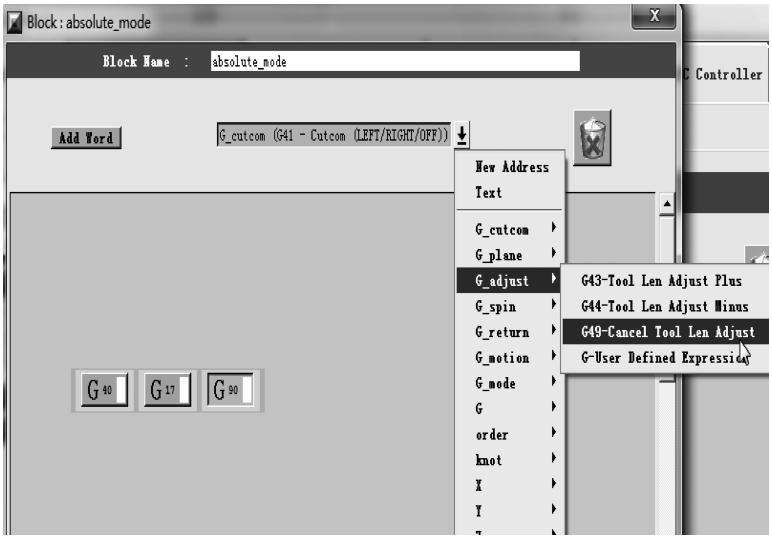


图 2-10-100　从下拉列表中加入需要的字块

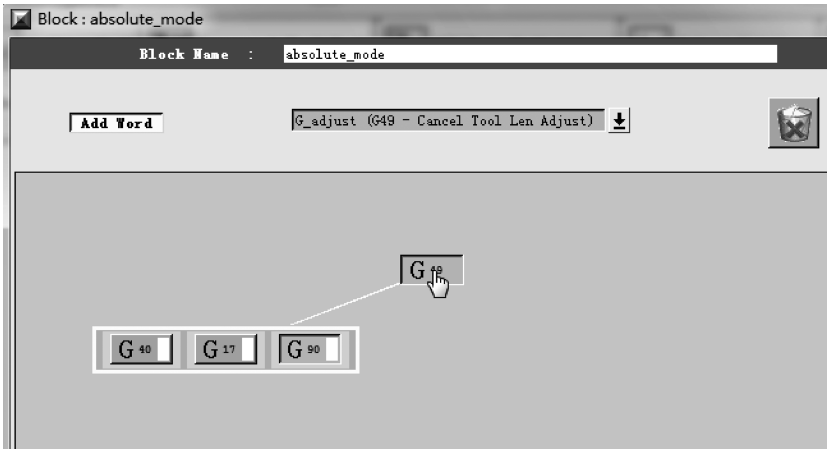


图 2-10-101　拖动添加字块

2）单击右侧窗口中“Star of Path”节点下的“PB_CMD_start_operation_force_addresses”选项，如图 2-10-103 所示。

3）在弹出的“Custom Command”对话框中将文本框中的“fourth_axis fifth_axis”内容选中，单击右键，选择“Cut”选项，将这些文本内容删除，如图 2-10-104 所示。单击“OK”按钮，接受更改。

4）添加 NX 程序名辅助信息，单击选择下拉列表框中的“MOM_set_seq_on”选项，左键按住“Add Block”按钮拖动，添加到“Start of Path”节点下“PB_CMD_start_of_operation_force_addresses”之后，如图 2-10-105 所示。

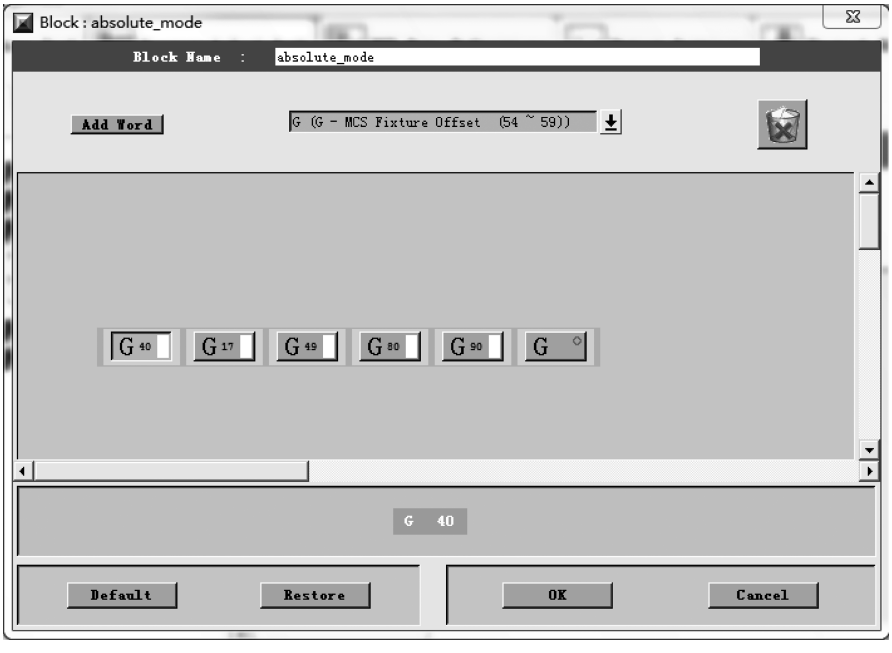


图 2-10-102　程序头格式

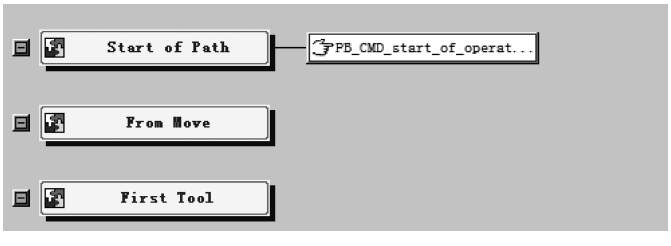


图 2-10-103　选择强制输出程序行

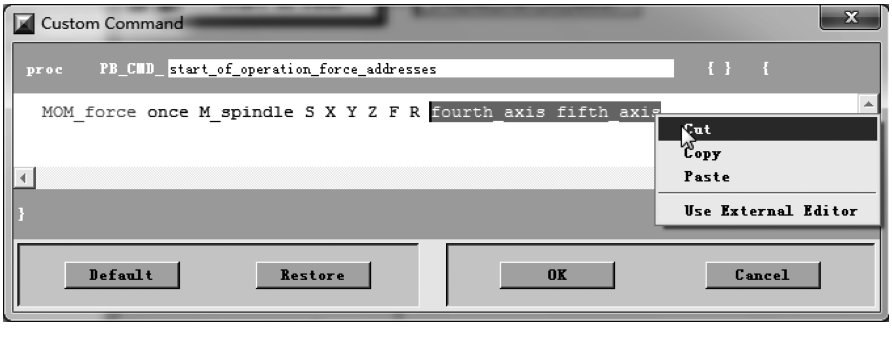


图 2-10-104　删除强制输出内容

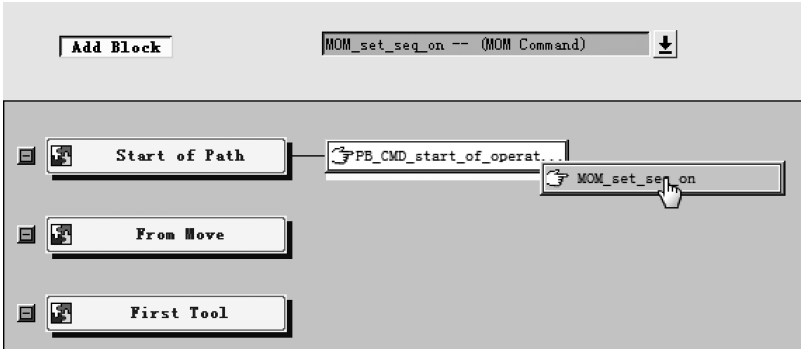


图 2-10-105　添加序号打开控制行

5）使用同样的方法将右侧“Operator Message”添加到“Star of Path”节点下的“MOM_set_seq_on”之后，在弹出的对话框中输入“$ mom_path_name”，如图 2-10-106 所示。

6）将右侧下拉列表中的“MOM_set_seq_off”添加到“Star of Path”节点下的“$ mom_path_name”之后，如图 2-10-107 所示。

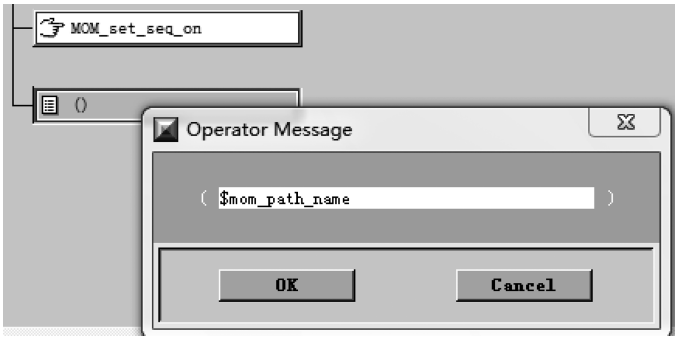


图 2-10-106　添加刀轨信息到后处理中

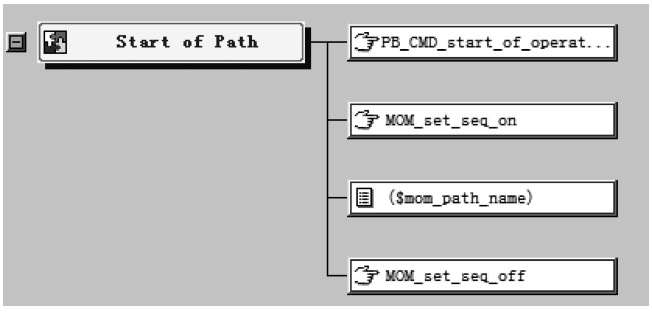


图 2-10-107　添加序号关闭控制行

步骤5：定制操作结束处的格式。

1）在左侧树形结构窗中选择“Operation End Sequence”。

2）将右侧下拉列表框中的“New Block”添加到“End of Path”节点中，如图2-10-108所示。

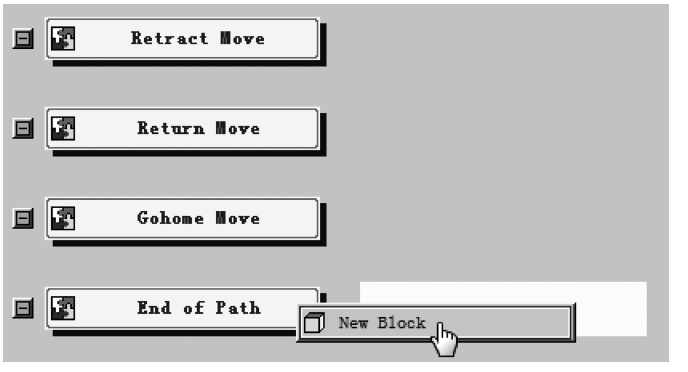


图2-10-108　将“New Block”添加到“End of Path”节点中

3）在弹出的对话框中可以看到“Block Name”为“end_of_path_1”。

4）在上方下拉列表框选择“More”→“M_coolant”→“M09”加入。

5）单击“Add Word”按钮，将其拖到对话框中，如图2-10-109所示。

6）单击“OK”按钮，退出该对话框。

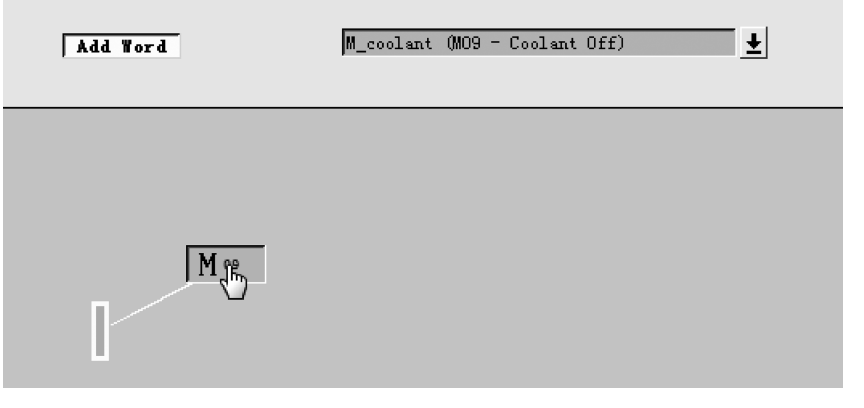


图2-10-109　添加“M09”

7）采用相同的方法选择“New Block”→“More”→“M_Spindle”→“M05”加入。

8）再选择“New Block”→“More”→“M”→“M01”加入。

9）将右侧下拉列表框中的“New Block”添加到“End of Path”节点中“M05”和“M01”之间，如图2-10-110所示。

10）在弹出的对话框上方的下拉列表框中选择“G_mode”→“G91”加入。

11）在下拉列表框中选择“G”→“G28”加入。

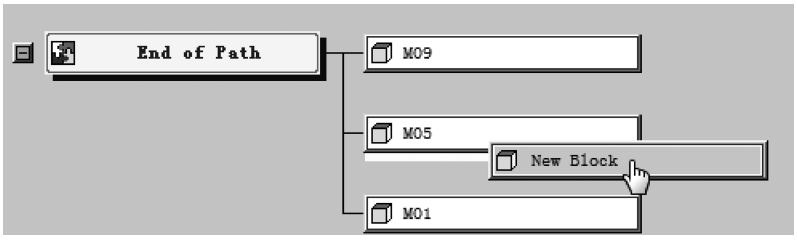


图 2-10-110　添加机床辅助指令到程序结尾处

12）再从下拉列表框中选择“Z_Zero”加入，在弹出的“Expression Entry”对话框中的“Expression”文本框中输入“0”，如图 2-10-111 所示。

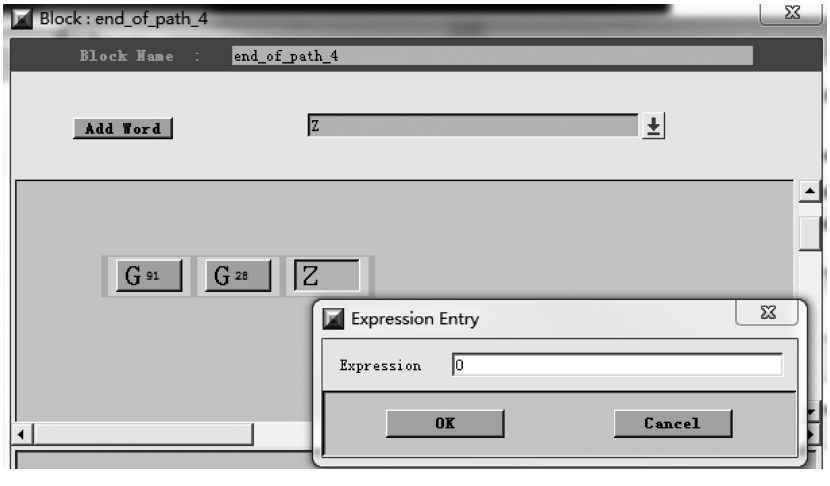


图 2-10-111　在“Expression”文本框中输入“0”

13）连续单击“OK”按钮返回“Operation End Sequence”主界面。

14）在右侧窗口“M09”上单击右键，选择“Force Output”选项，如图 2-10-112 所示；在弹出的对话中选中“M09”复选框，然后单击“OK”按钮返回，如图 2-10-113 所示。

15）采用相同的方法，对“M05”、“G91　G28　Z0”和“M01”块进行处理。

步骤 6：定制 NC 程序结束处的格式。

1）在左侧树形结构窗口中选择“Program End Sequence”。

2）选择右侧窗口选项“End of Program”节点下的“PB_CMD_nurbs_end_of _program”块，将其拖至回收桶删除，如图 2-10-114 所示。

3）选择“End of Program”节点中的“MOM_set_se q_off”块，将其拖至回收桶。

4）选择“File”→“Save”选项，保存后处理文件。

步骤 7：在 Template_Post. dat 文件中加入新建的后处理文件。

1）在“Post Builder”菜单栏中选择“Utilities”→“Edit Template Post Data File”选

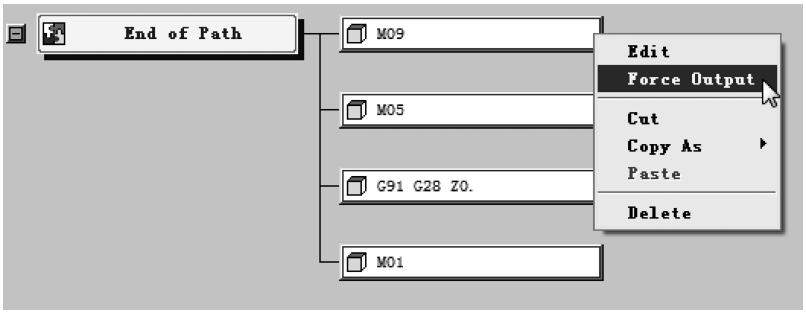


图 2-10-112　设定强制输出

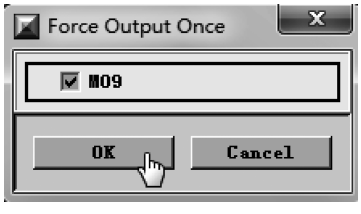


图 2-10-113　“Force Output Once”对话框

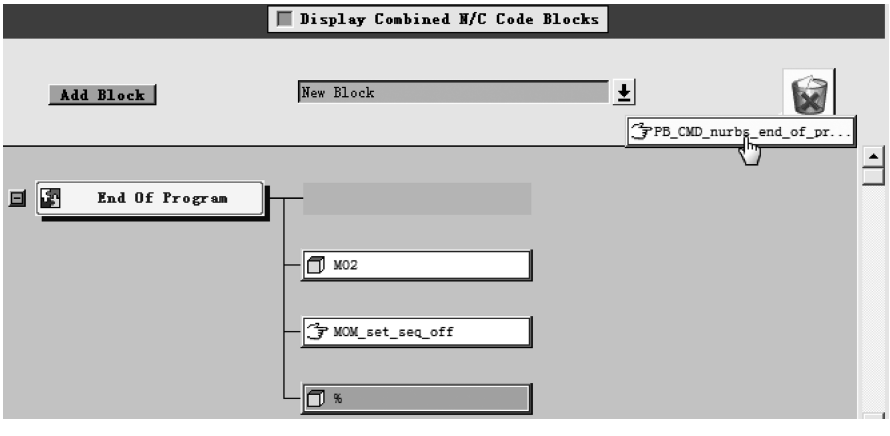


图 2-10-114　删除“PB_CMD_nurbs_end_of_program”块

项，如图 2-10-115 所示。

2）在弹出的如图 2-10-116 所示的“Install Posts”对话框中高亮选择“TOOL LIST”行，然后单击“New”按钮。

3）在弹出的“打开”对话框中，找到用户目录，并选择刚刚保存的后处理文件，如图 2-10-117 所示。

4）单击“打开”按钮，刚刚选择的后处理文件就被加入到了 Template_Post. dat 文件中，如图 2-10-118 所示。

图 2-10-115　编辑后处理模板

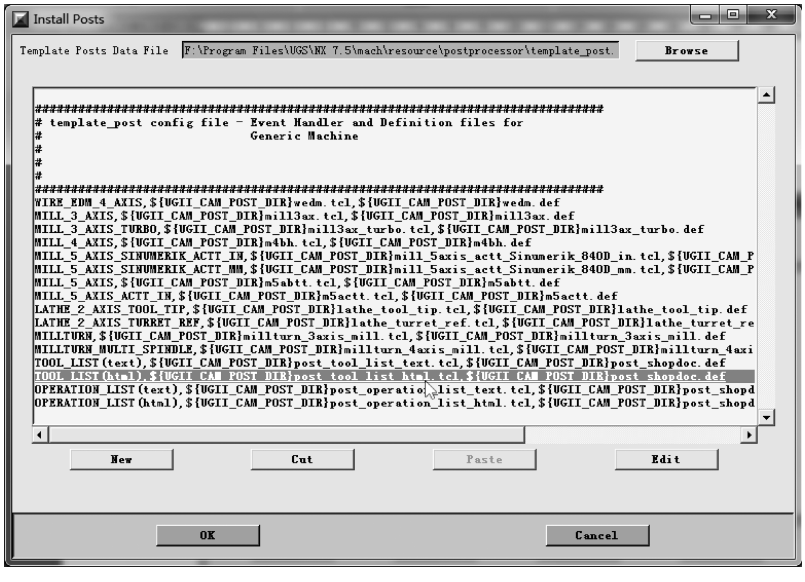


图 2-10-116　显示 Template_Post. dat

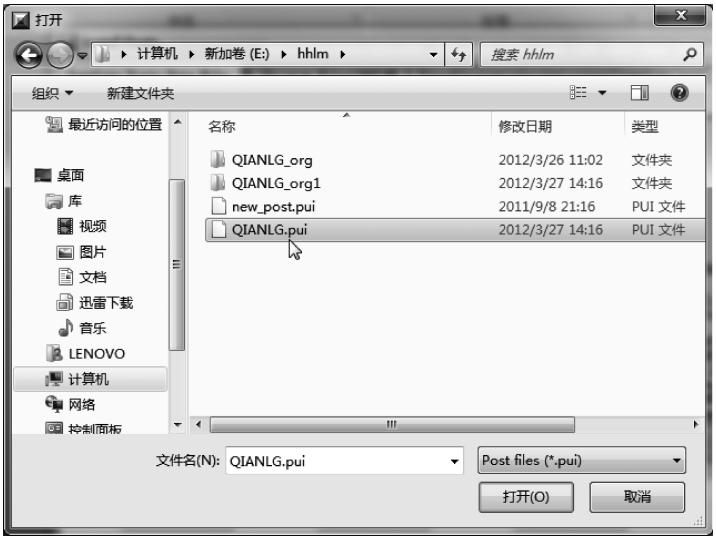


图 2-10-117　“打开”对话框

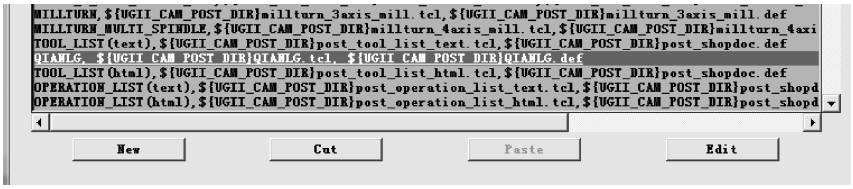


图 2-10-118　后处理文件添加到 Template_Post. dat 文件中

5）单击“OK”按钮，弹出“另存为”对话框，如图 2-10-119 所示。如果需要，再次选择 Template_Post. dat 文件，单击“保存”按钮。

6）在弹出的提示对话框中单击“Yes”按钮，替换已存在的 Template_Post. dat 文件。

7）单击“Cancel”按钮。

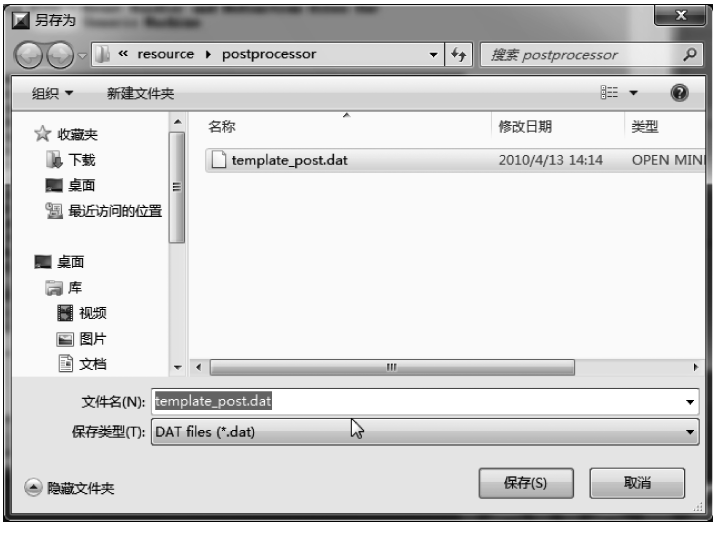


图 2-10-119　“另存为”对话框

步骤 8：校验后处理文件是否已经被加到后处理对话框中。

1）打开 NX 软件，选择一个 prt 文件打开。

2）进行入“Manufacturing”（加工）模块，单击“后处理”按钮 后处理，打开“后处理”对话框。

3）在“后处理”对话框中可以看到新增加的后处理文件 QIANLG，如图 2-10-120 所示。

4）单击“取消”按钮，关闭对话框。

图 2-10-120　新增加的后处理

第四节　程序的输入及输出

一、SIEMENS 系统的程序传输

（1）RS232C 串口　通过 RS232C 接口传输数据的操作方法如下：

NC 侧（机床侧）：＜SHIFT + ALARM＞组合键→＜PLC＞→＜STEP7 连接＞

进入接口设置：波特率：192000

停止位：1

奇偶校验：NONE

数据位：8

设置完毕后即可与计算机进行通信。

（2）CF 卡　可以用来备份机床系统数据以及传入传出系统参数及加工程序。方法如下：

1）传出参数：

＜SHIFT + ALARM＞组合键→＜调试文件＞→＜802D 数据＞→＜复制＞→＜CF 卡＞，可以把数据备份到 CF 卡中。

2）传入程序：

＜SHIFT + ALARM＞组合键→＜调试文件＞→＜CF 卡＞→找到要传入的程序，＜复制＞→＜PROGRAM＞→找到相应的目录后按＜粘贴＞键。

二、FANUC 系统的程序传输

用内置以太网口（或 PCMCIA 卡）进行文件的传输

1. 内置以太网端口

1）相关的 NC 参数设定。

	#7	#6	#5	#4	#3	#2	#1	#0
14880								ETH

#0 ETH：是否使用嵌入式以太网（内置端口/PCMCIA 以太网卡）。“0”为使用，“1”为不使用。

2）嵌入式以太网功能设定。

① 按下按键 SYSTEM。

② 按▶键（扩展）直到显示＜内嵌＞和＜PCMCIA＞按键。

③ 按下按键＜内嵌＞，出现用于设定内置以太网端口的设定画面，如图 2-10-121 所示。按下＜PCMCIA＞按键，出现用于 PCMCIA 的以太网卡的以太网设定画面。

④ 公共画面设定：“设备有效”对应选择“内置板”选项。

⑤ 项目设定 1（表 2-10-1）。

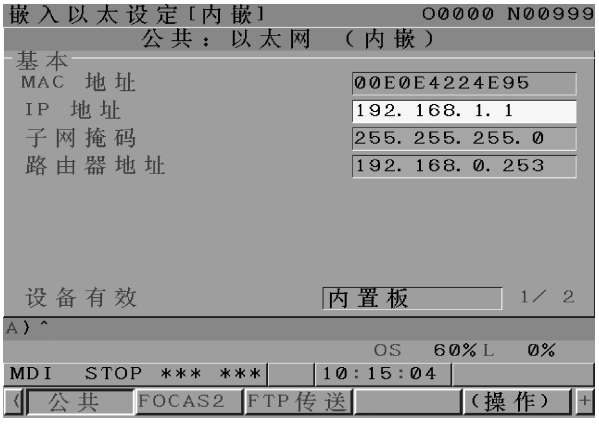


图 2-10-121　公共画面

表 2-10-1　项目设定 1

项　　目	说　　明
IP	指定嵌入式以太网的 IP 地址 （指定格式：192. 168. 1. 1）
子网掩码	指定网络的 IP 地址的子网掩码 （指定格式：255. 255. 255. 0）
路由器地址	指定路由器的 IP 地址 （指定格式：192. 168. 0. 253）

⑥ FOCAS2 画面如图 2-10-122 所示。

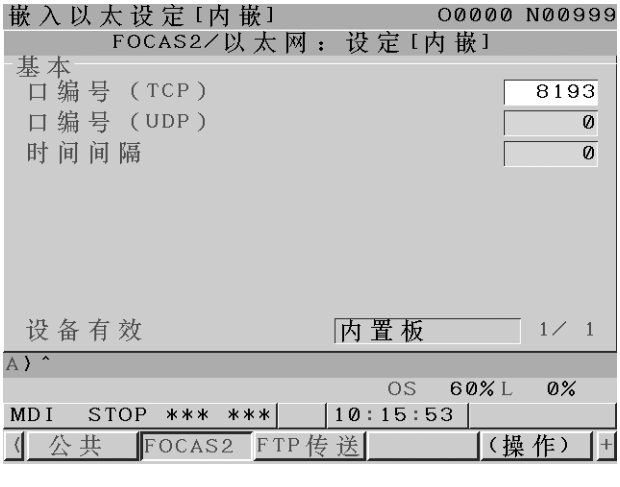


图 2-10-122　FOCAS2 画面

⑦ 项目设定 2（表 2-10-2）。

表 2-10-2　项目设定 2

项　　目	说　　明
TCP	指定的 FOCAS2/Ethernet 功能上使用的端口号，输入范围为 5001 ~ 65535.
UDP	作为 FOCAS2/Ethernet 功能使用时设定为 0
时间间隔	作为 FOCAS2/Ethernet 功能使用时设定为 0

2. PCMCIA

如果选用 PCMCIA，如图 2-10-121 所示，设备有效显示“PCMCIA 卡”，具体操作方法如下：当 NC 中的嵌入式以太网中的各个参数设定完时，按图 2-10-121 中的〈操作〉键，在出现的画面选择〈内嵌/PC〉，再在出现在的界面上按〈执行〉键，当界面上的“设备有效”为“PCMCIA”时，即完成设定。

出厂前设定默认值如下：

IP 地址：192. 168. 1. 1。

子网掩码：255. 255. 255. 0。

口编号（TCP）：8193。

口编号（UDP）：0。

时间间隔：0。

3. 伺服向导调整时的通信设定

NC 设定：打开伺服调整软件 SERVO GUIDE，单击操作界面上的“通信设定”按钮，弹出对话框如图 2-10-123 所示。

将 IP 地址和通道号设定与 NC 中的 IP 地址和通道号相同，单击“测试”按钮，当“结果”显示为“OK”时，通信设定成功。

图 2-10-123　“通信设定”对话框

4. NC 与 FANUC LADDER-Ⅲ连接设定

1）将 NC 中 NO. 24 参数作如下设定。

24	11

2）在个人电脑上打开 FANUC LADDER-Ⅲ软件，单击操作界面上的“TOOL”按钮，选择“Option”选项并在出现的画面上单击“setting”按钮，如图 2-10-124 所示。

3）单击“Network setting”按钮，出现如图 2-10-125 所示的对话框。

4）单击“ADD Host”按钮，弹出如图 2-10-126 所示的对话框。

① 在“Host”文本框中输入和 NC 中相同的 IP 地址号，单击“OK”按钮，回到“Option”对话框。

② 在“Enable device”列表框中选择刚设定的 IP 地址号，单击“ADD >> ”按钮，并选中“Use dive”列表框中的其他 IP 地址，单击“ << delete”，单击该界面上的“OK”按钮。

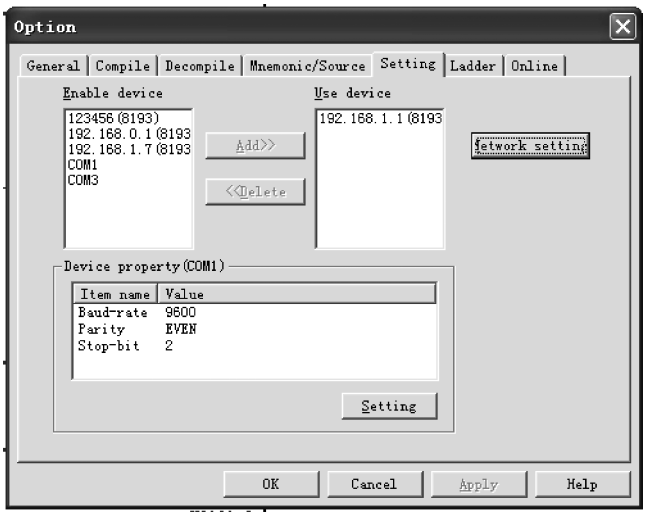


图 2-10-124　“Option”对话框

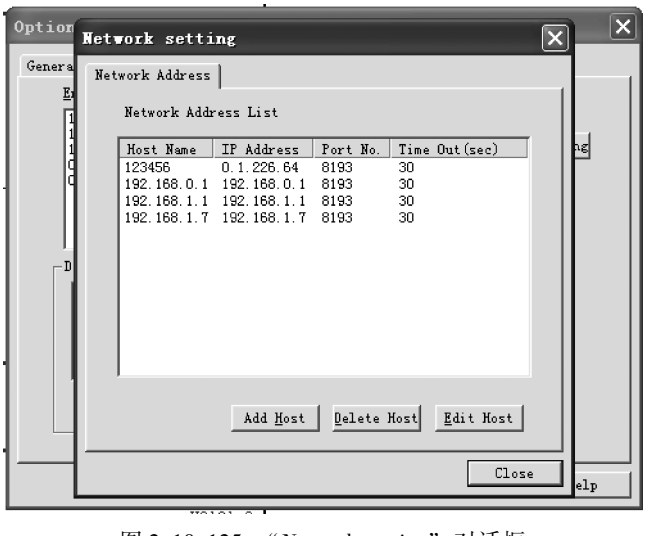


图 2-10-125　“Network setting”对话框

③ 回到“Option”对话框，选择“On line”选项卡，FANUC LADDER-Ⅲ即与 PMC 连接成功。

三、用 RS232C 串口进行文件的传输

机床 NC 的数据可以在 NC 和计算机之间进行传输。以下种类的数据可以进行输入/输出：

1）加工程序。

2）偏置数据。

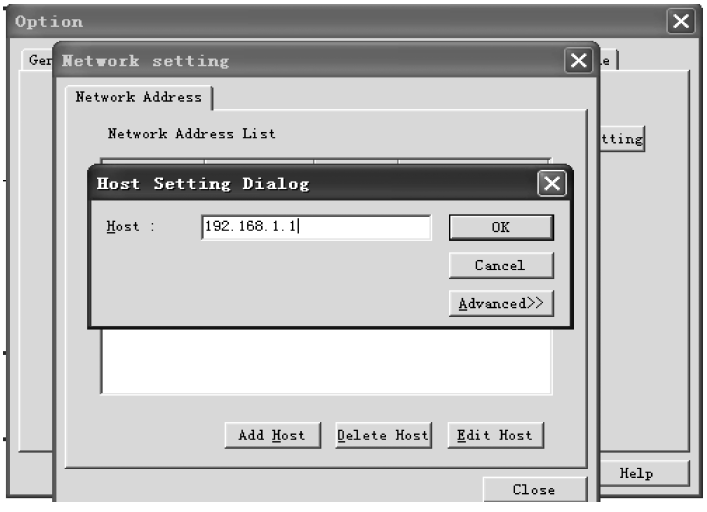


图 2-10-126 “Host Setting Dialog”对话框

3）参数。

4）螺距误差补偿数据。

5）用户宏程序变量。

用 WINPCIN 软件在 FANUC 系统上进行上传下载程序及 DNC 在线加工的设置方法如下。

1. 机床侧参数设定

SETTING OFFSET	（设定）
NO. 0000 = 00000010	（数据输出时的代码为 ISO 代码）
NO. 0020 = 0	（选用 0 通道进行数据输入/输出）
NO. 0100 = 00101000	
NO. 0101 = 00001001	（停止位为 2 位）
NO. 0102 = 0	（选用 RS-232-C 进行通信）
NO. 0103 = 11	（波特率为 9600）

2. 计算机侧参数设定

计算机侧需设置为用 COM1（具体设定以计算机的设备管理器中显示的端口为准）口进行通信，并将相关的通信参数重新设定、确认。

波特率：9600（机床侧最快可设达 19200）。

数据位：8 位。

停止位：2 位。

奇偶校验：NONE。

流控制：Xon/Xoff。

注：由于一般的 PC 中没有专用的 RS232C 接口，为了方便使用需要将 RS232C 接

口通信转成 USB 接口与 PC 进行通信。RS232C 转 USB 端口的设置：将转接端口插入 PC 的 USB 口中，安装驱动程序，从设备管理器中找到其位置，进行以上的参数设置。

3. 设置 WINPCIN 软件

打开 WINPCIN 软件，选择“RS232 CONFIG”，作如下设置：

COMM PORT：COM4（具体设定以计算机的设备管理器中显示的端口为准）。

BAUDRATE：9600。

PARITY：NONE。

DATA BITS：8。

STOP BITS：2。

FLOW CONTROL：选择“SOFTWARE”。

ELSE：选择“ACTIVATE TEMINAL”和“STOP WITH EOF”。

单击“Save&Activate”按钮。

注：机床在通电前，将计算机 COM 口与机床电柜侧的 RS-232-C 接口用传输线连接好。注意，以上操作严禁带电操作，以免将接口烧坏。

4. 数据上传与下载

数据上传与下载时，要将 NC 置于 EDIT 方式下。

1）数据下载。以加工程序下载为例，按 < PROG > → < 列表 + > → < (操作) > ，按扩展键，按 < F 输出 > →输出名称选择“O 设定”→ < 执行 > →按 WINPICN 软件上的 < Recieve Data > 输入文件名并保存，直到该画面上的 < EXIT > 键重新可操作时，数据即下载完毕。

2）数据上传。以加工程序上传为例，按 < PROG > → < 列表 + > → < (操作) > ，按扩展键，按 < F 输入 > →输出名称选择“O 设定”→ < 执行 > →按 WINPICN 软件上的 < Send Data > ，找到文件并打开，直到该画面上的 < EXIT > 键重新可操作时，数据即上传完毕。

注意：无论是数据的上传操作还是下载操作，都应遵循以下原则：

① 永远是准备接收数据的一方先准备好，处于接收状态。

② 发送与接收端的通信参数设定一致。

四、用 CF 卡进行文件的传输

1. 在应用 CF 卡之前需要对一些参数进行设置：

SYSTEM　　（参数）

NO. 0020 = 4　　（选用存储卡进行数据输入/输出）

NO. 0110#0 = 0　　（不进行输入/输出通道号的分离控制）

断电后重新启动。

2. 参数的输入/输出

1）参数的输入。选择“SYSTEM”→“参数”→“操作”，选择 EDIT 模式，选择“F

输入”，再选择“执行”，画面右下方的“输入”提示信息闪烁，处理完成时“输入”显示消失。若要取消输入，单击“取消”。

2）参数的输出。选择“SYSTEM”→“参数”→“操作”，选择 EDIT 模式，选择“F 输出”，输出全部参数时选择“全部”，输出非 0 的值时选择“样品”，再选择“执行”，画面右下方的“输出”提示信息闪烁，处理完成时“输出”显示消失。若要取消输出，单击“取消”。

3. 程序的输入/输出

1）程序的输入。选择 EDIT 模式，

按下功能键 < PROG > ，再选择“列表”→“操作”→“F 输入”，输入程序的名称后选择“F 名称”，输入程序号后选择“O 设定”，最后选择“执行”，画面右下方的“输入”提示信息闪烁，处理完成时“输入”显示消失。若要取消输入，单击“取消”。

2）程序的输出。选择 EDIT 模式，

按下功能键 < PROG > ，再选择“列表”，通过翻页键寻找要输出的程序，输入程序号并选择“O 检索”，就显示选定的程序，再选择“操作”，通过扩展按钮找到“输入/出”并选择，选择“F 输出”，输入程序的名称后选择“F 名称”，输入程序号后选择“O 设定”，最后选择“执行”，画面右下的“输出”提示信息闪烁，处理完成时“输出”显示 消失。若要取消输入，单击“取消”。当要选择输出全部程序时，“O 设定”应该为 -9999。

第十一章
加工中心操作方法

第一节　通用操作方法

一、操作加工中心的五个环节

加工中心的操作共有工件装夹、建立坐标系、准备刀具、编制程序与操作机床五个主要环节，认真掌握好每个环节的要领，在生产中就可以做到得心应手。其中工件装夹和编制程序两个环节最能反映操作者的技术水平。

普通零件的加工工艺保障的是质量和效率，其中效率的因素更大。而关键零件的加工工艺保障的是质量，工艺质量的高低直接决定工件合格与否。工件装夹能反映出操作者的工艺水平。

1. 工件装夹

工艺路线确立之后，就要考虑工件的装夹方法及选择夹具。大批量、大型、关键零件的夹具一般由工艺技术人员负责设计，而一些简单的工装、夹具常常需要操作者自行设计制作。

1）在设计简单夹具时，需要注意以下几点：

① 面定位时不要用整个面定位，留出三个定位点即可，其余铣掉。也就是说：定位接触面要小，定位点之间距离尽量大。

需要四点定位时，其中一点要选择浮动支撑，避免过定位。

② 如果定位面是一个外圆或者内圆，不要用整圆定位，使用三个销子即可。

③ 正确把握定位元件的长短所限制的自由度，根据工件的大小、定位的需要，选择合理的定位元件长度，避免过定位或者增加工件装卸难度。

④ 夹紧力一定要通过工件的可靠部位传到夹具的支撑点上，不能有使工件变形的趋势。

2）安装、夹紧工件的过程中，需要注意以下几方面：

① 注意夹具在工作台上的摆放位置，避免与机床部件干涉。有些大型工件的非加

工部分超过工作台尺寸，此时要特别注意当工作台走到极限位置时或者防护门关上时发生干涉。

② 检查压板位置，避免与刀具干涉。这点最容易忽略，铣到压板的事故屡见不鲜。

③ 特别要仔细观察工件与夹具支撑面是否完全贴合，用手轻轻敲几点就可以感觉到。对于位置公差严格的工件尤其重要。

④ 不要总在工作台上的某一个位置加工，这样会造成丝杠、导轨的局部磨损，不利于延长机床使用寿命。

⑤ 大型零件（例如床身、立柱、滑板等）的定位是否可靠，是影响到一些重要几何公差能否合格的关键因素（例如导轨的平行、扭曲等）。一般采用三点固定支撑加一点（或多点）辅助支撑的方法，此方法对于定位面为非工作面的零件（例如床身底面）是适用的。但对于必须用四点定位的工件（例如滑板），装夹时必须保证四点同时可靠接触。最简单而实用的办法就是在每个定位面上垫一张厚薄一致的纸。压紧之前，保证每张纸抽拉不动；若有松动的，就一定要检查原因。

⑥ 扩大加工范围的一种简单方法。利用数控机床的坐标旋转功能，将工件表面找平之后，不必非要零件的基准边与 X 或者 Y 轴平行，之后无论是用刀具、测头，都可以很快求出工件基准边与坐标轴的偏移角度 α，将工件坐标旋转 α 后就可以加工了，只是要注意旋转方向。

计算方法如下：

$$\alpha = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

将图 2-11-1 中的数字代入，即可得到偏移角度为 12°。

特别是在加工没有基准边、只能找正两个基准孔的零件时，就更显出其优越性。这种方法除了减少一个方向的找正外，另一个作用就是可以扩大加工范围。

如图 2-11-2 所示，工作中常常遇到工件的长度比机床 X 轴行程稍长的情况，除非把工件放到工作台上实际检测，否则无法判断能否加工。对于大型机床这样做就不方便了。此时可用 AutoCAD 中的尺寸标注“对齐”功能来估算出在宽度一定时可以加工的最长的工件长度，两个尺寸越接近，可加工范围就越大。

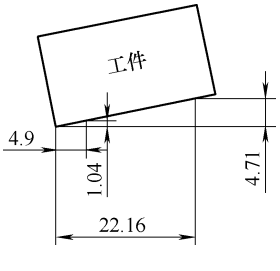


图 2-11-1　适当扩大加工范围的方法

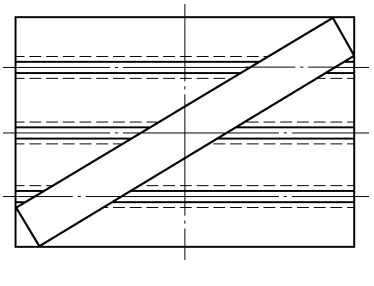


图 2-11-2　用 AutoCAD 尺寸标注中的“对齐”功能来估算

例如，在工作台尺寸为750mm×510mm的机床上，若工件宽100mm，则可加工的最长尺寸约为814mm。

详细的解析数学计算方法见第四篇的案例4“工件在工作台上的摆放问题”。

2. 建立坐标系

关于坐标系的知识见本篇第九章。

建立坐标系包含两个步骤：测量工件原点的位置和数据输入。

（1）测量工件原点的位置　在立式加工中心上测量工件原点位置的工具可以用寻边器、标准圆柱，也可以使用杠杆表。

使用杠杆表有两个优势：一是节约时间，因为在之前的操作步骤往往是用杠杆表来找正工件，工件找正之后把杠杆表表座直接移到主轴端面上就可以开始测量了，减少了更换测量工具的辅助时间；二是观察数据直观，减少误差，精度较高。

抡表时，应注意如下事项：

1）表盘要在回转圆的切线方向上，否则影响测量精度。

2）对边测量时最为方便，但若只能单边测量，则需要一只对表环，同样可以达到很高的精度。

（2）数据输入　数据输入主要有如下两种方法：

1）手动输入。得到工件坐标系原点的数据后，在机床控制面板上找到相应的坐标系页面，通过<INPUT>键将其输入即可。有一些控制系统，例如FANUC 0i MC系统，可以通过“测量”键就能把主轴当前位置的数值直接调入工件坐标系数值存储器，避免了手工输入的繁琐操作。

2）在程序中使用赋值语句设定工件坐标系。这种方法在交换工作台的机床操作中经常使用，保证了无人操作的需要。在FANUC系统中其格式为

G10 L2 P_IP；

其中，G10为可编程参数输入，L2为坐标系赋值，P为工件坐标系序号（1～6，对应G54～G59），IP为相应的原点坐标。

例如工件坐标系5的原点坐标值为：

$x=456.70$，$y=123.40$，$z=-567.89$，则赋值语句为：

G10 L2 P5　X456.70　Y123.40　Z-567.89；

该语句执行后，就会用以上数值覆盖工件坐标系5中原来的坐标。

3. 刀具准备

有关刀具的详细内容见本篇第六章，此处强调几点注意事项：

1）无论何种加工过程，排屑对于加工质量与加工效率都有重要影响，例如“面铣刀为什么不能从工件中间满刀切过”、“卧铣时入刀点的选择”、“钻削深孔时为什么要不断抬刀”等问题都与此有关。排屑效果最好的措施是采用中心内冷刀具，并且当冷却泵的压力高于1.5MPa时效果更好。因此购买机床时主轴是否带内冷功能对于强调生产效率的企业是一项重要条件。

2）选择（包括安装）刀具时，要遵循长度越短越好、直径越粗越好的原则。只有

这样才能减少振动，从而获得较高的切削速度。

刀具使用时的受力状态，等同于悬臂梁（图2-11-3）。受到外力时，其刀尖的位移 f（单位：mm）为：

$$f=\frac{64\times F\times l^3}{3\times\pi\times \mathrm{E}\times d^4}$$

式中 F——刀具受到的简化后的径向力（N）；

l——刀具伸出长度（刀柄夹持以外的长度，mm）；

E——刀具材料的弹性模量；

d——刀具直径（mm）。

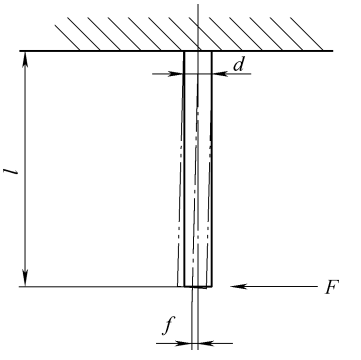


图2-11-3 刀具加工过程中的受力变形简图

由上式可以看出，刀尖的位移（即刀具的变形量）与刀具伸出长度的3次方成正比，与刀具直径的4次方成反比。f 值越小则刀具振动越小，振动是造成刀具损坏、加工效率降低的主要因素。因此选择、安装刀具时，刀具的直径要尽量粗而刀具的长度要尽可能短一些，只要加工时不干涉即可。

3）粗、精加工刀具要分开。有些操作者粗铣、精铣都使用一把刀，这样不可能达到较高的表面质量要求。

4）钻孔。钻孔是加工中心最常使用的加工方式，对钻孔的要求主要有位置精度、孔的轮廓精度和效率三项。

① 位置精度。为了提高位置精度常常采用中心钻钻中心孔的方法，在加工中心上不要使用普通车床所用的中心钻，而应该使用90°中心角的中心钻，这样在钻中心孔的同时可以把倒角加工出来，以提高加工效率。

但是韩国YESTOOL公司认为只有预钻中心孔的深度和孔的直径接近时才能保证有效的导向。建议在加工位置度要求很高的孔时，考虑该因素。

② 轮廓精度。轮廓精度既与材料的均匀性有关，也与钻头的制造精度及强度有关。当生产节拍与位置精度要求都很严格时，可以采用硬质合金的定心钻。该类钻头是磨制的，不用中心钻也可以获得较高的位置及轮廓精度。

③ 效率。使用涂层刀具、硬质合金刀具可以有效地提高加工效率。加工大孔时，推荐使用山特维克公司的U钻，不只是效率高，孔的轮廓度也较好。应注意U钻需要用中心刃起定位的作用，因此预钻孔不仅不必要，还会造成刀片损坏。

5）铣加工。铣加工属于轮廓加工，在加工中心上使用最多，刀具的种类也最多，使用技术也比较复杂，从刀具选择到加工参数都有很多讲究。衡量铣加工质量的标准主要也有三项：尺寸精度、表面粗糙度以及加工效率。系统刚性（包括主轴刚性）对这三项都有极大的影响。

① 尺寸精度。主轴刚性是保证尺寸精度的重要因素，在零件结构允许的情况下，首先要选择直径尽可能大的刀具。

在轮廓加工时，机械进给系统的滞后和伺服系统的时间滞后对轮廓精度的影响都是随进给速度的提高而增加的。为了在保证加工精度的同时提高加工速度，FANUC 系统提供了 G08 预读处理功能，可以抑制由加减速造成的伺服系统的延迟，通过插补前的直线加、减速和拐角自动减速功能，刀具轨迹可以精确地跟随指定值，降低轮廓的加工误差。另外还有预读多个程序段进行处理并进行插补前的直线加减速的 G05.1 指令。由于在多个程序段的预先加、减速，它可以使加、减速平滑从而实现高速加工。

② 表面粗糙度。

a. 影响表面粗糙度的最主要因素在于主轴刚性与系统刚性。例如工件系统刚性较差，使用 45°主偏角的面铣刀加工平面，此时如果出现颤动，单纯降低进给参数就不起作用了，一定要改换 90°主偏角的面铣刀才行。

b. 进行较深的型腔加工时，刀具系统刚性的对表面粗糙度及加工效率影响更大。此时使用热装刀具效果较好。

c. 进行薄壁加工时就不能只考虑表面粗糙度了，此时工件刚性与变形是最重要的问题。对于两面都要加工的薄壁，精加工不但要两面轮流进刀，每次进刀位置也要错开。

③ 加工效率。由于铣加工的用途最广泛，加工效率就格外重要。提高效率除了上述因素以外，还有以下几点需要考虑：

a. 尽管想用大直径刀具，但是加工内轮廓拐角时，刀具半径必须小于拐角圆弧半径。为此在采用刀具半径补偿且刀具半径等于拐角圆弧半径时，精加工在拐角处可以不编辑拐角圆弧；如果必须编辑，系统会报警，此时将刀具半径数值减少 0.001mm 或 0.002mm 即可取消报警。

b. 粗加工内轮廓后，在拐角处的残留较大。当精加工刀具运行到此处时，切削力会突然加大，不但影响表面粗糙度，还会造成刀具损伤。解决的办法是在粗加工前，先用与圆弧拐角半径相同的钻头或者键槽铣刀进行预加工，注意孔的位置，要为精加工留出余量。

c. 多数铣刀切削刃是右螺旋方向的，作用在铣刀上的反作用力可以分解为水平分力和向下的垂直分力。铣刀的螺旋角越小，向下的分力越大。常常见到有些槽越铣越深，就是铣刀柄夹持力不足所致。可选用强力弹簧夹头刀柄，如果铣削力很大，还可以选用侧固式刀柄。

d. 铣加工时常常用宏程序编程，循环语句格式对加工时间有很大影响，从而影响加工效率。详见本章的“五、提高效率的一些小措施”。

e. 铣加工的方式可分为小切深大进给和大切深小进给。究竟选择哪种方式取决于工件硬度及机床系统刚性。如果可能建议使用后者，除了表面粗糙度值较小以外，还有助于提高刀具利用率。

6）镗孔。镗孔尤其是精镗，操作者的经验和技术比刀具的影响更大。加工深孔、大孔时加工参数不合适会造成刀尖快速磨损，导致孔直径变小，影响孔的轮廓度；更重要的是精镗孔时如果一刀镗过去直径仅差 0.005mm，没有进入公差带，这时修整就

比较困难了，尽管可以采用径向不进给再镗一刀的方法，但是表面粗糙度会受影响。因此要求操作者在试镗以后，调整尺寸确保一次成功。这比较考验操作者的技术水平。

7）铰孔。通常的铰刀是从上方排屑，如果孔的表面粗糙度值要求较小，为了防止切屑划伤孔壁，可以使用下排屑的铰刀。若是不通孔，在使用时孔的前端必须留有足够的存屑空间。

铰刀虽然是成形刀具，但是切削参数选择不当就会造成孔超差。详见第三篇第四节“铰刀加工之后孔径为什么会小于铰刀直径?”

8）螺纹加工。螺纹加工主要有两类工具：一类是成形刀具，如丝锥；另一类是螺纹铣刀。

在加工中心上根据工件材料及主轴功率的不同，一般 M30 以下的螺纹可以使用丝锥加工。使用丝锥的加工方法分为浮动攻螺纹和刚性攻螺纹。浮动攻螺纹时装夹丝锥的刀柄是浮动夹头，刀柄沉重，但是丝锥在工作过程中可以有上下 5mm 左右的轴向移动量，能够有效防止主轴旋转与 Z 轴进给不同步对丝锥的伤害。但是现在的控制系统已经很好地解决了同步的问题，在一般螺纹的加工中浮动夹头的作用已不明显。刚性攻螺纹使用的是装夹铣刀的弹簧夹头，不但刀柄质量轻，还可以大大提高加工速度。比如在硬铝上加工 M8 的螺纹，浮动夹头的转速超过 700r/min 时，加工出来的螺纹就乱扣了，使用刚性攻螺纹转速可以超过 2000r/min。

螺纹铣刀也分两种：单齿的螺纹铣刀和多齿的螺纹梳刀。它们的加工都不受螺纹直径的限制。螺纹铣刀使用比较灵活，只要牙型合适，螺距在一定范围之内的螺纹都可以用一把刀加工。螺纹梳刀只能加工固定螺距的螺纹，由于它有一排齿，加工效率大大提高，只是在螺旋入刀、螺旋出刀时都要增加 Z 轴的移动，否则对螺纹的表面粗糙度及牙型反而有伤害。

4. 编程

编程分为手动编程和自动编程。随着计算机和 CAM 软件的发展，不再是在型腔加工和多轴机床上才使用计算机辅助制造技术。加工中心操作者应掌握自动编程这门技术。它不仅仅快速、准确，掌握它之后操作者可以很容易从一种操作系统过渡到另一种新操作系统。2012 年北京队集训准备参加第五届全国数控技能大赛，当时两名未曾使用过 SIEMENS 系统的年轻选手只经过短短的 10 天练习就能就走上赛场并且提前完成全部实操考试内容。除了选手天赋较好以外，拥有计算机辅助编程相关经验是主要因素。

手动编制程序环节反映的是操作者对数控系统的理解。一名优秀的操作者通过对程序格式以及系统功能的理解和发挥，可以用清晰流畅的逻辑关系、简单明了的语句，编写出正确的、循环时间最少的加工程序。

尽管很多单位有专门的程序员，或者使用 CAM 软件编程，但是对于一个操作者而言，手动编程仍然是基本功，只有对于程序指令的深刻了解，才能及时发现问题或错误、才能更好地发挥机床的全部功能。

手动编程时除了对编程指令（包括刀具半径补偿、极坐标、子程序、镜像、比例

缩放、坐标系旋转、局部坐标系、增量编程、宏程序、重复语句编程等）要熟悉以外，在操作面板上进行程序输入时也要通过熟练使用“删除”“插入”和“拷贝”等功能键来提高效率。同时尽量利用“背景编辑”功能来减少辅助时间。

在编程环节还有如下的一些细节和措施，如果操作者注意到，能给工作带来很多方便。

1）编辑程序号要遵循一个统一的原则，要有延续性，方便后续查找。例如程序号的个位数只留给子程序用，这样程序之间的关系一目了然，删除、存储程序时不会有遗漏。

2）编程结束时避免主轴从工作面直接去换刀，多编辑一段 Z 向抬刀的语句可以避免很多故障。

3）为了减少辅助时间，可以在内存中存储一些通用的宏程序，需要时像使用固定循环语句一样调用即可。下面是几个例子，操作者熟练宏程序编程之后可以再多编辑一些其他的内容，使用会更加方便。

① 铣削任意尺寸矩形平面的宏程序。

铣削平面是粗加工常遇到的工序，如果工件表面较宽需要多次走刀的话，编程就比较麻烦。现在只要输入矩形长度、矩形宽度、铣刀直径、重叠系数、工件中心的 X 坐标及 Y 坐标六个参数就可以开始加工了，而且刀具在工件的前后左右方向都可以。

已知条件：#1、#2、#7、#17、#24、#25。

#1—矩形平面 X 向宽度　（A）（增量值）
#2—矩形平面 Y 向宽度　（B）（增量值）
#7—面铣刀直径　（D）
#10—刀具中心到 X 轴的行数　（n 刀之间有 $n-1$ 行）
#17—铣削重叠系数　（Q）（0 < #17 < 0.5，一般取 0.2 ~ 0.4）
#20—实际铣削次数
#23—每刀实际铣削宽度　（W）
#24—矩形平面中心 X 坐标值　（X）（绝对值或增量值表示）
#25—矩形平面中心 Y 坐标值　（Y）（绝对值或增量值表示）
#5001—程序段终点 X 坐标　（主轴当前位置，绝对值表示）
#5002—程序段终点 Y 坐标　（主轴当前位置，绝对值表示）

```
O6001
N5   #3 = #4003;                    (储存 03 组 G 代码 G90、G91)
N10 IF [#3 EQ 90]  #GOTO  1;        (在 G90 方式转移到 N1)
N15   #24 = #5001 + #24;            (计算矩形中心的 X 坐标值，#5001—程序
                                     段终点 X 坐标)
N20   #25 = #5002 + #25;            (计算矩形中心的 Y 坐标值，#5002—程序
                                     段终点 Y 坐标)
```

```
N25  N1  IF[#5001  LT [#24 - #1/2]] GOTO  5;  (起刀点在 -X 方向)
N30  IF [#5001  GT [#24 + #1/2]] GOTO  2;     (起刀点在 X 方向)
N35  IF [#5002  GT [#25 + #2/2]] GOTO  3;     (起刀点在 Y 方向)
N40  IF [#5002  LT [#25 - #2/2]] GOTO  4;     (起刀点在 -Y 方向)
N45  N2  G68  X#24  Y#25  R180;
N50  GOTO  5;
N55  N3  G68  X#24  Y#25  R - 90;
N60  GOTO  5;
N65  N4  G68  X#24  Y#25  R90;
N70  GOTO  5;
N75  N5;
N80  #20 = ROUND[[#2 + #7 × #17]/[#7 × [1 - #17]]];
                                  (实际铣削次数,以单行程计,四舍五入取整)
N85  #23 = [#2 + #7 × #17]/#20;          (每刀实际铣削宽度或行距)
N90  #10 = [#20 - 1]/2;          (刀具中心自 Y 向最远端到 X 轴的行距数,
                                  Y 向排列 n 行,则有 n - 1 个行距)
N95  WHILE[#10  GT  0]DO  1;
N100  G0  G90  Y - #23 × #10;                (选择逆铣方式)
N105  G1  X[#24 + #1/2 + #7]  F500;
N110  G0  Y#23 × #10;
N115  G1  X[#24 - #1/2 - #7];
N120  #10 = #10 - 1;
N125  TF[#10  EQ  0]  GOTO  10;
N130  IF[#10  LT  0]  GOTO  11;
N135  END  1;
N140  N10  G0  Y0;
N145  G1  X[#24 + #1/2 + #7];          (#10 = 0 时刀具轨迹不重合,
                                  需在 Y0 的位置再加工一次)
N150  N11  G0  Z100;
N155  G69  G90;
N160  M5  M9;
N165  M2;
```

调用此程序时按如下格式赋值即可。

G65 P6001 A（#1 矩形长度）、B（#2 矩形宽度）、D（#7 铣刀直径）、Q（#17 重叠系数）、X（#24 矩形中心 X 坐标）、Y（#25 矩形中心 Y 坐标）；

注意：Z 向进给到尺寸后，再调用 P6001。

为了简化编程，开始加工之前要把主轴中心停在任意一个入刀位，如图2-11-4 所示。

② 加工圆周排列的孔的宏程序。

加工圆周上排列的孔也经常遇到，使用这个程序方便简洁，需要对宏程序相关知识有一定的了解。孔的排列如图 2-11-5 所示。

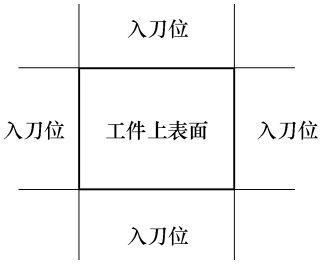


图 2-11-4　铣削平面宏程序的刀具起始位置示意图

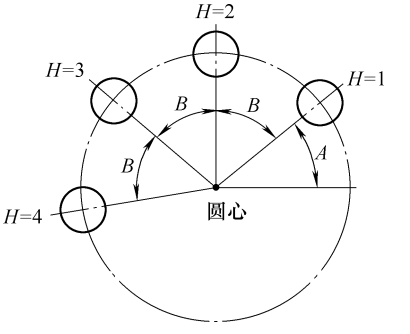


图 2-11-5　圆周排列的孔示意图

G65　P6002　Xx　Yy　Zz　Rr　Ff　Ii　Aa　Bb　Hh；

X：圆心的 *X* 坐标（绝对值或增量值）（#24）

Y：圆心的 *Y* 坐标（绝对值或增量值）（#25）

Z：孔深　（#26）

R：R 平面坐标　（#18）

F：切削进给速度　（#9）

I：圆半径　（#4）

A：第一个孔的角度　（#1）

B：增量角　（逆时针为正）

H：孔数　（#11）

被调用执行加工任务的宏程序

```
O6002;
#3 = #4003;                          (储存 03 组 G 代码，增量还是绝对值格式)
G81  Z#26  R#18  F#9 K0;             (钻孔循环，也可使用 L0)
IF [#3 EQ 90]  GOTO  1;              (在 G90 方式转移到 N1)
#24 = #5001 + #24;                   (计算圆心的 X 坐标)
#25 = #5002 + #25;                   (计算圆心的 Y 坐标)
N1  WHILE [#11GT 0]  DO  1;          (剩余孔数为 0 之前执行循环)
#5 = #24 + #4 × COS [#1];            (计算待加工孔的 X 坐标)
#6 = #25 + #4 × SIN [#1];            (计算待加工孔的 Y 坐标)
G90  G00  X#5  Y#6;                  (主轴到钻孔位置，执行固定循环语句)
#1 = #1 + #2;                        (下一个孔的角度)
#11 = #11 - 1;                       (未加工的孔的个数)
```

```
END  1;
G#3  G80;                          (回到原始状态 G 代码)
M99;                               (返回主程序)
```

主程序中调用宏程序的示例。

```
O6000;
G90  G54  X0  Y0  Z100;
G65  P6002  X100.0  Y50.0  R3.0  Z-20.0  F100  I100.0  A0  B45.0  H5;
M30;
```

如果不熟悉宏程序，能够熟练掌握子程序、增量编程、重复语句、坐标系旋转也可以完成同样的工作。

程序如下：

```
O0001;
…;
G81  Rr  Zz  F200  K0;        (仅输入钻孔循环参数，而不钻孔)
Xx  Yy;                       (钻起始孔)
G90  G16;                     (极坐标编程)
Xa  G91  Yb  Km;              (Xa—极坐标半径，Yb—相邻孔的角度，Km—剩
                               余孔的个数)
G15  G80;                     (取消极坐标、取消固定循环)
…;
M02;
```

5. 操作机床

(1) 手动操作　手动操作往往用于工件装夹找正步骤，有时一个简单的加工也用手动。

手动操作是操作机床的基本环节，手动操作时离不开手动脉冲发生器（简称手摇盘)。衡量一名操作者思维是否清晰，可通过观察其使用手摇盘时的熟练程度。许多操作者在选好要移动的轴之后不考虑方向，一看摇反了马上换过来，虽然只是一个细节，但反映了操作者的水平。

手动操作时配合增量坐标显示，及时清零就可以简化计算工作。

另外，检查加工尺寸不一定非要专用量具，只用一块杠杆表就可以测量长度尺寸、斜度等，尤其是一些较大的尺寸，使用机床的坐标显示进行测量时精度往往更高。

(2) 自动操作　自动操作之前要进行“试切”（详见本章“二、试切要领”)，“试切”有两个目的：一是检查程序，二是测量工件尺寸检验加工参数正确与否。

检查程序可以使用“空运行”和“机床锁住”功能，但是要注意有的设备在执行“机床锁住”功能之后，坐标会产生变化，需要重新返回坐标原点。

程序检查通过之后还要检查如下内容：

1)“选择停”按钮是否关闭。

2) 机床进给倍率是否恰当。

3）切削液管位置应当兼顾长短不同的刀具。

4）如果是湿切，要保证使用面铣刀时有充足的切削液。

上述内容检查完毕，即可执行自动操作。操作过程中要听声音，判断刀具运行情况及主轴负载；及时清理切屑不但可以延长刀具使用寿命，还可以减少工件的受热变形。

（3）操作注意事项

1）<RESET>键的使用。各个机床制造厂家对复位后清除的内容都不一样，操作者应清楚了解，关键要注意“半径补偿”、“长度补偿”、“坐标系”三方面，其他如加工参数等不会引起大的事故。

“半径补偿”复位后一般都取消；“长度补偿”复位后 A850 系统不取消；复位后坐标系显示差别较大，例如：FANUC-15 的坐标系不变，FANUC 0i 的坐标系返回 G54；三菱系统返回 G54，因此操作者应当认真观察机床显示。

2）编程错误检查。编程出现错误在所难免，但是出现报警后，不要局限在光标所在的程序段检查，因为计算机一般预读三个程序段。这一点许多初学者往往忽略。

3）操作机床时严禁脚踏防护罩。防护罩被长时间踩踏会产生变形，导致护板之间出现间隙，切削液、切屑等会洒落在丝杠及导轨上，使润滑油变质。

4）提高字符的手动输入速度和准确性。无论在技能比赛还是在生产中，手动数据输入是少不了的。在训练中作过几次测试，平均每秒钟输入 1 个字节的速度就不慢了。熟能生巧，操作者平时一定要加强练习，最好能够做到双手输入。

（4）机床运行中的工作　在机床自动运行的时候，操作者应当从事以下事项：

1）检查刚卸下的工件质量。

2）为已加工完的工件倒角、去毛刺。

3）清理下一件毛坯的定位面。

4）更换磨损刀具。

5）观察，尤其是监听机床运行状况。

二、试切要领

试切是机床操作最容易发生故障的环节，但是只要按照操作要领，一步步认真检查，事故是可以避免的。

1. 试切开始前应检查易错点

1）坐标系名称是否与建立的工件坐标系一致，包括修改、编辑程序之后遗漏的坐标系。

2）刀具长度补偿程序段中的 H 代码、刀具半径补偿程序段中的 D 代码是否缺失。

3）需要手动操作的位置，“选择停”按钮是否点亮。例如：镗孔时检查孔尺寸时，需要手动安装、拆卸大直径刀具时。

4）轮廓加工从圆弧退出时容易遗漏 G01。

5）不想经过中间点返回参考点时，例如“G28 G91 Z0;”中的 G91 不可遗漏。

6）子程序中使用增量编程后，结束时务必改回 G90。

7）G43 长度补偿时，许多人不考虑移动方式是 G00 还是 G01，使用 G00 速度太快，一旦疏忽来不及补救。建议使用 G01，可以将速度提高到 5000mm/min 左右，这个速度是操作者来得及反应的，而刀尖位置也最好设在 100mm，既安全又方便测量。

8）G00 快速定位的轨迹可以通过参数设定为插补轨迹或各轴都以最高速度移动。建议设定为插补轨迹，这样较直观且不易与压板等发生干涉。尤其是空运行检查点位加工的轨迹时更明了。

9）检查精镗刀的刀尖安装方向，是否与固定循环语句中让刀方向相反，若一致将划伤孔壁，让刀距离大还会发生严重事故。

2. 重要程序试切步骤

1）打开“单步运行”按钮。

2）进给倍率拨到“0”档（快进倍率也降到最低）。

3）执行第一个程序段，此时机床不会动（若执行的是快速进给，机床会缓慢移动）。观察“余移动量”坐标窗口，此时可以知道三个信息：

① 将要移动的轴。

② 移动的方向。

③ 移动的距离。

这一步观察非常重要，是保证安全的关键步骤。若数据与图样相符时再打开倍率旋钮，机床开始运行，该程序段执行完毕后，把倍率重新降到最低，再执行下一个程序段。以上步骤应严格执行，这样可避免在面对一个不熟悉的程序时出现意外。

三、故障发生之后的处理方法

发生故障之后，除将旋转的刀具停止外，必须保持现状不变。对此各单位均应有明确的制度规定。只有维持现场原状，才能准确地分析事故原因，为设备修理提供条件；同时只有正确地观察、分析事故现状，才能正确地判断、总结事故原因，避免今后犯同样的错误。有些人在事故发生的一瞬间发现错误所在，马上修改程序、坐标系等，以摆脱责任，这种做法极不可取且无法根除故障隐患。不仅耽误生产，更是违背职业道德。讲诚信应放在首位，出事故已经犯了一次错误，撒谎伪造现场则是错上加错。

可以说，绝大部分事故都是人为造成的，但是由于一些控制、电气方面的故障不直观，一些人就将事故原因推给机床，这样很不科学。如果是设备的故障，一般来说都可复现，若是外界干扰则必有干扰源，这时需要冷静地思考。

比如前一天试切好的程序第二天一运行机床就撞刀，检查之后发现坐标值有误。操作者认为是设备有问题，受到外界干扰导致数据发生错误；设备管理者认为干扰不可能，是操作者的责任。实际双方都有些片面，通过分析、请教专家可知：外界干扰会使数控机床发生故障，但是这种故障不会影响到存储器内的数值变化；但是如果是计算机传输数据，则因为外界干扰产生错误就很有可能了。对于这种事故，不排除前一天操作者调试好程序后的操作存在错误。这时需要大家静下心来仔细回想，心平气和地讨论分析，才能得出正确的结论。

四、交接班记录内容

填写交接班记录是一项重要的日常工作内容，除了每个单位规定的要求之外，对于数控机床有以下几点是在记录中必须交代的。

1）机床运行情况及故障处理内容。

2）保养项目。

3）当前加工状况：

① 图样名称、件号及加工部位。

② 程序号及相关的加工内容。

③ 使用的工件坐标系序号、原点坐标。

④ 刀库内改变的项目及详细参数。每台机床都应有一份刀库内容的数据表，此数据应当及时更改，保持其有效性。

五、提高效率的一些小措施

1）多编辑一个子程序，既减少程序运行时间，又避免机床做无用功。

加工图 2-11-6 所示的四个孔位，常常只编辑一个子程序，按照一个顺序进行加工，例如 1→2→3→4。一般来说，点位加工需要多把刀具才能完成。此时第一个工步“点中心孔”加工完毕，主轴停在第四个孔之后去换刀，然后空走到 1 号孔位置再按照 1→2→3→4 的顺序开始加工。如果多编辑一个子程序，其顺序是 4→3→2→1，则机床在第一个工步完成之后在原地就开始第二个工步的加工了，如此可省去一个空行程。

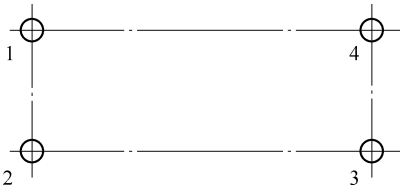


图 2-11-6　点位加工的顺序

2）立式加工中心可在程序结束时加一程序段：

G53　G90　G00　Ymax；

其中，“Ymax”表示该机床 *Y* 向行程最大值。其目的是在加工结束时将工作台移到最前面来，方便操作者装卸工件。

3）宏程序循环采用 WHILE 语句比 IF 语句的运算速度高。

使用条件转移语句（IF）进行循环时，其框图如图 2-11-7 所示。

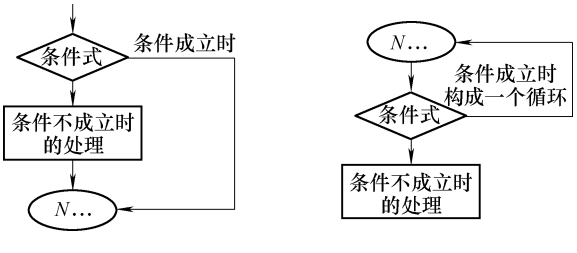


图 2-11-7　IF 语句的循环示意图

WHILE 语句执行循环时的框图如图 2-11-8 所示。

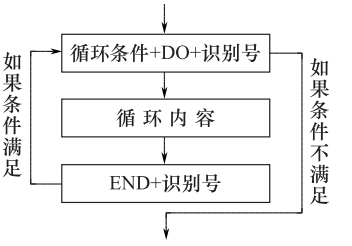


图 2-11-8　WHILE 的循环示意图

条件成立时，循环执行从 DO 到 END 之间的程序，条件不成立时，进入到 END 语句。

IF 语句产生循环是在 GOTO 语句中由标号转移构成的，这时要进行顺序号反向检索，反向检索的时间要比正向检索时间长，所以 IF 语句构成的循环运算慢。而 WHILE 语句循环直接向下检索 END 速度就快多了。铣削 55°密封管螺纹的例子如下：

```
N10 N1 #2 = #2 - #4 × #1;
N20 G1 X[#2 × COS[ - #1]] Y[#2 × SIN[ - #1]] Z[#5 × #1] F300;
N30 #1 = #1 + 2;
N40 IF[#1LE#3] GOTO 1;
```

其中：

#1——锥螺旋线上任意一点到原点的连线与 X 轴的夹角，起始赋值#1 = 0。

#2——锥螺旋线上任意一点到原点的距离，起始赋值#2 = 螺纹大口半径。

#3——刀具总旋转度数，起始赋值#3 = 360 × 螺纹圈数。

#4——每旋转 1°#2 的变化量，#4 = 锥螺纹每圈半径的变化量/360。

#5——每旋转 1°刀具沿轴向的进给距离，#5 = 螺距/360。

执行此程序时可以达到设定的速度，但是将倍率提高到 200% 时，实际进给速度只能达到 480mm/min 左右。使用 WHILE 循环语句时，尽管程序行数比 IF 语句还多一行，但实际进给速度可以达到 600mm/min。具体程序如下：

```
N10 WHILE [#1LE#3] DO1;
N20 #2 = #2 - #4 × #2;
N30 G01 X [#2 × COS [ - #1]] Y [#2 × SIN [ - #1]] Z [#5 × #1] F300;
N40 #1 = #1 + 2;
N50 END1;
```

此螺纹为右旋螺纹，从上向下加工，所以#1 增量为负值。

4）带机械手的加工中心换刀之后先插入下一把刀号。

在机床加工时带机械手的刀库可以将下一把要使用的刀调到换刀位置，这两个过程是并行的。为了减少辅助时间，每次换刀之后应当先编辑一个程序段：调用一把刀，之后再编辑其他语句。例如：

```
O0001;
T1;
M6;
T9;
…
M02;
```

第二节　卧式加工中心操作方法补充

一、定期检查托盘回转中心的位置精度

托盘回转中心是机床坐标系 *X* 轴上的一个参考点。托盘围绕该参考点旋转 180°时，托盘上的任意点在旋转前、后的绝对值大小相等、符号相反。这样就方便了操作者编程与操作。但是仅仅设定了回转中心这个参考点是不够的，因为在 *X* 轴 0 点时回转，在机床坐标系中同样可以达到此效果，关键在于这个参考点要与“主轴中心线在 *X*、*Y* 平面内的投影与 *X* 轴的交点”重合，这样才能保证镗出来的孔中心到回转中心的 *X* 坐标值与托盘回转 180°后镗出来的孔中心到回转中心的 *X* 坐标值大小相等、符号相反，才能保证掉头镗孔的同轴度。

但是由于温度、振动等多种原因，相对于“主轴中心线在 *X*、*Y* 平面内的投影”，“托盘回转中心”这个参考点有时会有微小的漂移，这样就需要“检查托盘回转中心”。

检查卧式加工中心托盘的回转中心实际上是检查主轴中心线在 *X*、*Y* 平面的投影与 *X* 轴交点的坐标值，然后按照此项坐标值来修订托盘回转中心的参考点坐标。

检查分为测量误差与修改参考点坐标两个步骤，简易测量方法基本分为两类：第一类是将表装在托盘上，测量主轴上的心轴；第二类是将表装在主轴上，测量托盘上的标准块，该类测量方法稍微复杂，暂不介绍。

第一类方法虽然简单，但是在托盘回转过程中百分表受到振动等影响其状态容易改变，需要反复校对。测量步骤如下：

1）将心轴装在机床主轴上，在托盘中心附近安装磁性表座并安装百分表，首先检查心轴回转精度必须在合格范围内。

2）调整百分表的位置，使指针指向心轴中心，手动移动 *X*、*Y* 轴，找出心轴侧素线的最高点，调整百分表刻度盘使指针在最高点处指示为零位，此时记录 *X* 轴机床坐标或将 *X* 轴相对坐标清零，同时把 *Z* 轴增量坐标清零。

3）*Y* 轴不动，在手动方式下把 *Z* 轴沿正向移到安全位置。切换到 MDI 方式将工作台回转 180°，注意此时不要碰撞百分表，为了消除主轴跳动误差，同时需要手动将主轴也回转 180°。

4）把工作台向远离主轴中心线方向稍微移动一点距离。

5）再将心轴沿 –*Z* 方向移回原位，沿 *X* 轴移动托盘，直至百分表指示为 0，此时记录 *X* 轴机床坐标值或相对坐标值。

6）返回第 2 个测量位置，复查百分表是否回零。

修正方法如下：

将两次记录的 *X* 轴机床坐标值相加，结果除以 2，此数值即为机床回转中心参考点的 X 坐标值。或者直接把测量的 X 轴相对坐标值除以 2，得出的数值即为托盘回转中心坐标的偏离误差，将托盘移动此值后（注意方向），记录此时的机床 *X* 坐标值作为修

正后的托盘回转中心参考点坐标。

为防止机床机械部件及百分表等的误差对测量结果的影响，需要重复以上步骤两次，以三次测量的平均值作为最终结果。

二、在卧式加工中心上正确使用百分表的方法

1）在抡表找正圆心时，即使是使用较轻的杠杆式百分表，也要用弹簧夹头夹持专用表架，将百分表可靠地固定在主轴上。不能使用磁性表座，因为受到重力的影响表头的位置会不断改变，无法得到准确的数值。

2）测量直线时，将主轴设定为准停状态，避免主轴的微小颤动影响测量的准确性。

3）使用杠杆式百分表测量时，测量杆与被测表面的夹角越小，测量的准确度越高。

第三节　数控机床操作过程中需要重点维护保养的内容

数控机床需要定期维护保养，才能最大限度地发挥机床的使用效率和延长使用周期，根据多年的使用经验，需重点维护保养的内容如下：

1. 气源洁净

大部分的加工中心机床都是用气动方式控制换刀过程，在我国南方地区天气潮湿，气管里面经常有许多水汽，水汽过多会使相应的控制阀类部件生锈，导致换刀出现故障，所以每天必须将给机床提供气源的气泵放水，或者在气泵输出端配置干燥器。

案例：某私营企业在夏天购买了一台立式加工中心机床后招聘一名新人来操作机床，使用三个月后与机床厂家联系说经常发生换刀故障，售后人员到现场维修时发现该机床松刀时气缸打刀动作有些慢，时间超过系统规定的时间就报警了，检查后发现该企业的气泵从来没有放过水，造成气量的流量不够，同时由于气源非常不干净，已经将控制松刀气缸的电磁阀内的密封圈严重腐蚀。当时更换了新的电磁阀，并要求操作者天天给气泵放水，后来该机床一直正常使用。

2. 润滑到位

数控机床各个轴的运动和主轴的旋转都需要不同型号的润滑油，如果没有使用正确的润滑油可能会造成润滑管路堵塞，由于一般润滑报警属于提示性报警，不会停机，有些操作者就忽略了，造成需润滑的部位没有润滑油，运动部件干磨导致故障产生，所以要求每周检查所有润滑系统是否正常。

同时注意不同部位的润滑油油品是不一样的，例如给三轴润滑的是一定牌号的极压锂基脂，给主轴气缸润滑的是 36 号汽轮机油等，千万不能混淆。

案例：有一家制造汽车配件的大型国有企业，操作者每天计件拿工资，没有维护保养机床的意识，当加工中心机床系统上方报警显示“润滑油已经没有，请停机加油”后，仍然没有引起操作者的重视，依然 24 小时不停机工作，最后造成三根直线运动轴

的丝杠和导轨严重磨损，维修费用巨大而且保养周期比较长。

3. 附件正常

数控机床在使用外部附件时，要保持管路畅通（如气管和水管），一般建议一周维护一次，如气枪、水枪管路是否有泄漏情况，气管、水管是否有折压现象等。检查各工装夹具的压板螺栓是否紧固，每把刀柄上的拉钉是否松动。

案例：某私营企业报修一台立式加工中心机床，在换刀过程中经常出现报警，根据报警内容判断出应该是相应的检测开关出现问题，客户机床才使用不到半年，开关怎么会出现问题呢？经过厂家的售后人员到现场检查才发现是由于客户使用的刀具上的拉钉有一些没有拧紧，操作者为了省事，没有按照操作规程锁紧拉钉，只是手动拧上，结果拉钉慢慢松开与刀柄产生间隙，造成检测开关没有检测到信号并报警。将拉钉按照正常操作拧紧后没有再出现过这类报警。

4. 及时排屑

积屑过多会造成外部开关的一些故障，根据切削量应定期及时清理积屑。在清理积屑时应注意，如果使用气枪、水枪，必须在主轴上安装一把刀具，同时主轴移动到工作台的最远处，防止积屑进入到主轴腔体内；纸带过滤机滤纸应定期更换，以保证主轴刀具切削液无杂质。

案例：同期发货到客户的两台加工中心机床，一台放在老车间使用，另外一台放在新车间使用，老车间是由经验丰富的操作者操作，新车间是由新招聘的员工操作，干同样的活，经过将近一年的使用，发现老车间的机床运行正常，精度不超标。而新车间的机床主轴精度变化比较大，经过厂家售后人员到现场检查发现，新车间机床的主轴锥孔中已经严重生锈磨损，同时发现机床使用的刀柄也都有不同程度的锈蚀。主要原因是操作者在清理积屑过程中用气枪吹工作台上的铝屑时，主轴上既不放置刀具又没有远离工作台，结果铝屑进入主轴锥孔中，当再次换刀时刀柄与主轴锥孔产生研磨，逐渐主轴精度丧失，只能将主轴拆回厂家修磨。

5. 关注异常

一般车间正常工作时的环境比较嘈杂，不容易发现问题，所以要求交班或者下班之前的时候仔细观察机床是否有异常，例如主轴旋转的声音，换刀动作等，如果发现异常应立即停机检查处理，故障排除后方可继续加工。这样避免更大的故障发生而耽误生产。

案例：有一家军工企业的操作者，在每次按照操作规程正常保养的过程中发现平时一个月补充一次切削液，而现在 20 天左右就需要补充，经过仔细检查发现切削液循环管路上一根水管由于质量问题出现砂眼并且慢慢渗水，在水管周围有许多线缆和电气元件，幸亏发现及时，否则时间一长就会发生很大的事故。所以关注小的细节往往会节省很多的维修成本。

第十二章
加工中心的精度检验

加工中心加工的精度最终是要靠机床本身的精度来保证的。加工中心本身的精度包括几何精度、定位精度和切削精度三个方面。

加工中心各项精度指标的好坏，直接决定数控机床的各项功能能否正常发挥，直接影响机床的正常使用。因此，数控机床精度检验对初始使用的数控机床以及维修、调整后机床的技术指标恢复是非常重要的。

加工中心精度检验的目的就是通过对机床的几何精度、定位精度和切削精度的检查、测量，来确定该设备是否符合其设计、制造的标准，以及是否能够满足其加工过程中的工艺要求。

第一节　几何精度的检测

加工中心的几何精度检验，又称静态精度检验，它综合反映了机床关键零部件经组装后的综合几何形状误差。

目前，检测机床几何精度的常用检测工具有精密水平仪、精密方箱、直角尺、平尺、平行光管、千分表、测微仪、高精度检验棒及刚性好的千分表杆等。随着技术水平的不断进步，各种电子化的检测工具（如电子水平仪等）现已非常普及。检测工具的精度必须比所测的几何精度高一个公差等级，否则测量的结果将是不可信的。

加工中心几何精度的检查在几何精度检测中对机床地基有严格要求。

对于新安装的机床，机床水平状态的精调应当在地基及地脚螺栓的固定混凝土完全固化后再进行。精调时应把机床的主床身调到较精确的水平以后，再精调其他部分的水平精度。注意：机床几何精度的检测必须在机床水平状态精调后依次完成，不允许调整一项检测一项，因为机床几何精度有些项目是相互关联、相互影响的。例如：在立式加工中心检测中，如发现 Y 轴和 Z 轴方向移动的相互垂直度误差较大，则可以适当调整立柱底部床身的地脚垫铁，使立柱适当前倾或后仰，减小该项误差。但这样也会改变主轴回转轴心线对工作台面的垂直度误差。因此，对各项几何精度检测工作应在机床水平精调后一次性完成，以免出现由于调整后一项几何精度，而把已检测合

格的前一项精度调成不合格的情况。

对维修后需要进行几何精度检验的机床，也应该对机床的水平进行复核，在机床水平符合要求的前提下，再进行机床的几何精度检验。

机床几何精度检测应在机床整体温度稳定的条件下进行。因此，在非控温车间进行机床几何精度检测时，在检测之前应对机床进行通电运行，待机床充分预热后方可进行检测；在控温车间进行机床几何精度检测时，则不必进行预热运行。

以普通立式加工中心为例，该机床的几何精度检测内容如下：

1）工作台面的平面度。

2）各坐标方向移动的相互垂直度。

3）*X* 坐标方向移动时工作台面的平行度。

4）*Y* 坐标方向移动时工作台面的平行度。

5）*X* 坐标方向移动时工作台面 T 形槽侧面的平行度。

6）主轴的轴向窜动。

7）主轴孔的径向圆跳动。

8）主轴箱沿 *Z* 坐标方向移动时主轴轴心线的平行度。

9）主轴回转轴心线对工作台面的垂直度。

10）主轴箱在 *Z* 坐标方向移动时的直线度。

普通卧式加工中心几何精度检测内容与立式加工中心几何精度检测内容大致相似，仅多几项与平面转台和镗轴有关的几何精度。

每项几何精度的具体检测可按照国家标准 GB/T 21948.2—2008《数控升降台铣床检验条件　精度检验　第 2 部分：立式铣床》、GB/T 18400.9—2007《加工中心检验条件　第 9 部分：刀具交换和托板交换操作时间的评定》等的要求进行，也可按机床出厂时的几何精度检测项目要求进行。

第二节　定位精度的检验

加工中心的定位精度是指机床各坐标轴在数控装置控制下运动，所能达到的位置精度。加工中心的定位精度又可以理解为机床的运动精度。普通机床由手动进给，定位精度主要取决于读数误差和机械传动误差，而加工中心的各运动部件的移动是靠数字程序指令实现的，其定位精度取决于数控系统误差和机械传动误差。机床各运动部件的运动是在数控装置的控制下完成的，各运动部件所能达到的位置精度直接影响被加工零件所能达到的精度，所以，机床的定位精度是机床精度重要的检测内容。

机床的定位精度主要检测以下内容：

1）各直线运动轴的定位精度和重复定位精度。

2）直线运动各轴机械原点的复位精度。

3）直线运动各轴的反向误差。

4）回转运动（回转工作台）的定位精度和重复定位精度。

5）回转运动的反向误差。

6）回转轴原点的复位精度。

测量直线运动的检测工具有：测微仪和成组量规、标准刻度尺、光学读数显微镜和双频激光干涉仪等。回转运动检测工具有：360°齿精确分度的标准转台或角度多面体、高精度圆光栅及平行光管等。

第三节　切削精度的检验

机床的切削精度，又称动态精度，它是一类综合精度。它不仅综合反映了机床的几何精度和定位精度，同时还包含了试切零件的材料、加工刀具性能、环境温度以及切削时所选取的各个切削条件等各种因素造成的综合误差和计量误差。

为了反映机床的真实精度，要尽量排除其他因素的影响。切削试件时可参照国家标准 GB/T 2095. 9—2007 的相关规定，或按机床厂规定的条件，如：试件材料、刀具技术要求、主轴转速、吃刀量、进给速度、环境温度以及切削前的机床空运转时间等。

切削精度检验可分单项加工精度检验和加工一个标准的综合性试件的精度检验两种。加工中心机床切削加工试件的材料除特殊要求外，一般都采用一级铸铁，使用硬质合金刀具按标准的切削用量切削。

对于普通立式加工中心来说，其主要切削加工精度有以下几项：

1）镗孔精度。

2）端面铣刀铣削平面的精度。

3）镗孔的孔距精度和孔径分散度。

4）直线铣削精度。

5）斜线铣精度。

6）圆弧铣削精度。

对于普通卧式加工中心则还应增加以下项目：

1）箱体类零件掉头镗孔同轴度。

2）水平转台回转 90°铣四方加工精度。

近年来，随着我国机床工业的不断发展，目前多数机床厂家在进行加工中心类机床切削精度的检验时，使用 NASA 标准试件加专项加工精度（如：箱体类零件掉头镗孔同轴度）检验的方式进行。

我国于 1998 年就制定出 JB/T 8771—1998 标准，于 2010 年又推出新的国家标准 GB/T 18400. 7—2010。具体的检测件和检测方式如图 2-12-1 所示。

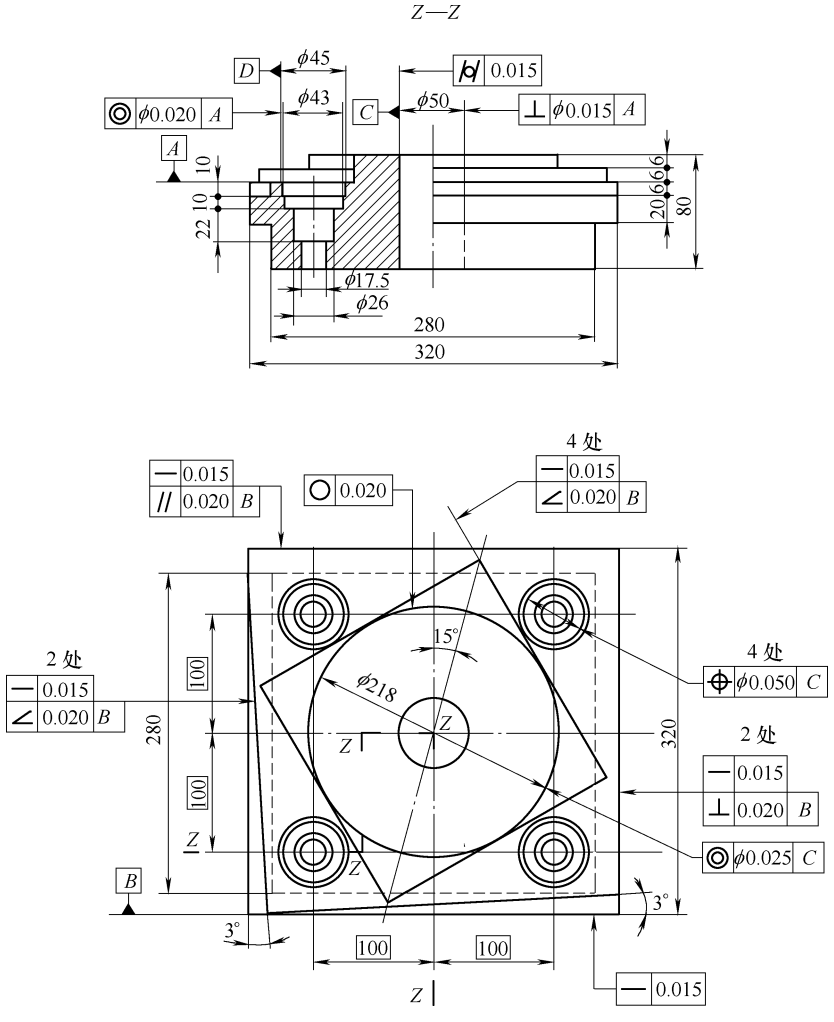


图 2-12-1　大规格轮廓加工试件

注：图 2-12-1 所示的是边长 320mm 的标准试件，国家标准中还有一种边长 160mm 的小规格标准试件，具体尺寸请参阅 GB/T 18400.7—2010。

第三篇 生产中的典型问题解析

第一章 工艺类问题

1. 加工过程中产生振动的原因是什么?

机械加工过程中，工艺系统经常会发生振动，即在工件和刀具的切削刃之间，除了名义上的切削运动外，还会出现的一种周期性的相对运动。振动按其产生的原因分成三种：自由振动、受迫振动和自激振动。据统计，受迫振动约占 30%，自激振动约占 65%，自由振动所占比例很小。

（1）自由振动　自由振动往往是由于切削力的忽然变化或其他外界力的冲击等原因所引起的。这种振动一般可以迅速衰减，因此对机械加工过程的影响较小。

（2）受迫振动　机械加工中的受迫振动，是一种由于工艺系统外界周期性干扰力的作用而引起的振动。机械加工中引起工艺系统受迫振动的激振力，主要来自以下几方面：

1）机床上高速回转件不平衡所引起的周期性变化的离心力。如由于电动机或卡盘、带轮回转不平衡而引起。

2）机床传动零件缺陷所引起的周期性变化的传动力。如因刀架、主轴轴承等机床部件松动或齿轮、轴承等传动零件的制作误差而引起的周期性振动。

3）切削过程本身不均匀性所引起的周期性变化的切削力。如车削多边形或表面不平的工件及在车床上加工外形不规则的毛坯工件。

4）往复运动部件运动方向改变时产生的惯性冲击。如平面磨削过程的方向改变或瞬时改变机床的回转方向。

5）由外界其他振源传来的干扰力。由邻近设备（如冲压设备、龙门刨等）工作时通过地基传来的强烈振动，使工艺系统产生相同（或整倍数）频率的受迫振动。

（3）自激振动　当系统受到外界或本身某些偶然的瞬时的干扰力作用而触发自由振动时，由振动过程本身的某种原因使得切削力产生周期性的变化，并由这个周期性变化的动态力反过来加强和维持振动，使振动系统补充由阻尼作用所消耗的能量，这种类型的振动称为自激振动。切削过程中产生的自激振动是频率较高的强烈振动，通常又称为颤振。

自激振动产生的主要原因如下：

1）切削过程中，切屑与刀具、刀具与工件之间摩擦力的变化。

2）切削层金属内部的硬度不均匀。

3）刀具的安装刚性差，如刀杆尺寸太小或伸出过长，会引起刀杆颤动。

4）工件刚性差。如加工细长轴等刚性较差工件，会导致工件表面出现波纹或锥度。

5）积屑瘤的时生时灭，使切削过程中刀具前角及切削层横截面积不时改变。

6）加工余量有变化，切削量不合适引起的振动，切屑宽而薄的切削易产生振动。

2. 一种加工板类零件的简单实用的夹具

在立式加工中心上经常加工板类零件，对于几件、十几件这样的小批量生产，即使使用组合夹具也很繁复。此处介绍一种简单夹具（图 3-1-1），非常适合板类零件小批量加工。

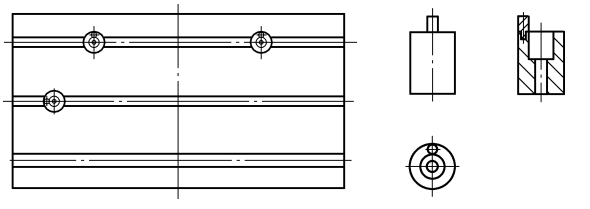


图 3-1-1　一种加工板类零件的简单夹具

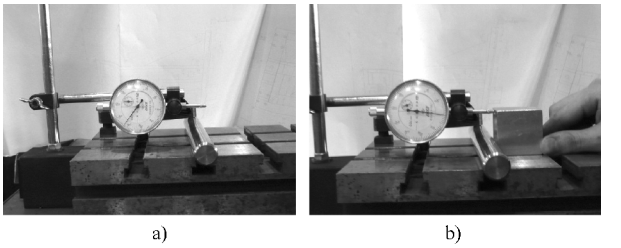
该夹具由三个等高的定位块组成，中间有阶梯孔，用内六角螺钉固定在梯形槽上，调整方便，连接可靠。定位块上面安装有定位销。

使用时将其中的两个定位销拉成一条直线，限制工件 Y 向移动及绕 Z 轴的转动，另外一个定位销限制 X 向移动。安装工件之后，在不干涉的位置放置一个辅助支撑，保证夹紧稳定可靠。

此夹具布置灵活，安装方向可横可竖，工件可大可小，既适合单件生产，又满足批量生产需求。

3. 一种简单准确的组合量具

图 3-1-2 所示的量具是由组合夹具与表架、百分表、标准芯棒等组装成的，采用比较测量法。图 3-1-2b 所示为其工作状态。根据该量具结构，可以判断它是一个检查工件垂直度的量具。



a)　　b)

图 3-1-2　批量生产时测量垂直度的非常实用的组合量具

其使用方法是首先将一个标准的芯棒固定在夹具上，然后将量规放在夹具上，量规的底面与夹具体接触，另一面与芯棒的圆柱面接触，此时安装上百分表并清零。然后取下量规，放上工件，位置与量规相同，检查百分表的数值，即可计算出角度偏差。该测量方法比用直角尺检查垂直度简单、直观、准确。它主要应用在批量生产的场合。

第二章
机械方面的问题

1. 机床 *Z* 轴坐标原点为什么设在最上方？

使用增量编码器的数控机床开机时需要进行返回参考点的操作，*Z* 轴坐标原点设在最上方，开机时主轴箱返回坐标原点才安全，其原因是：一方面如果工作台面上安装有大型夹具，主轴箱向下方运动将产生干涉；另一方面如果主轴上有刀，必须先还刀，否则即使工作台上什么都没有，刀具也要撞到工作台面。另外，机床的 *Z* 轴伺服电动机总是安装在 *Z* 轴的最上方，坐标原点设置在靠近伺服电动机一端，可以减少丝杠间隙的累积误差，另外对于半闭环系统的机床可以减少丝杠受热伸长产生的影响。

2. 机床各轴的原点为什么应当设在靠近该轴电动机的一侧？

图 3-2-1 所示为普通立式加工中心工作台部分的俯视示意图。工作台上依次摆放着 9 个相同的夹具。随着工作温度的升高，丝杠将受热伸长，最终影响工件与定位相关的位置精度。请问几号夹具上的工件受热变形影响最大？几号夹具上的工件受热变形影响最小？为什么？

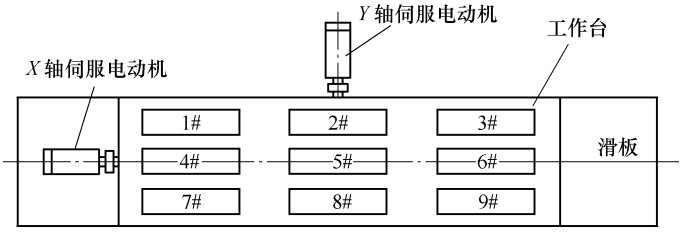


图 3-2-1　工作台上摆放多个子夹具的情况

从丝杠结构上讲，伺服电动机所在的一端是固定端。丝杠受热后，将向自由端伸长。钢材的热膨胀系数是 0.012mm/(m·℃)，半闭环控制的机床丝杠温度升高 3℃，则在距离固定端 1m 处丝杠就要伸长大约 0.04mm。按照图示 *X* 轴向右方、*Y* 轴向下方伸长，距离固定端越远的地方伸长越多。这个数值还是很大的。

1#夹具的位置虽然看起来离 *X* 轴伺服电动机、*Y* 轴伺服电动机都最近，但由于主轴的位置是固定的，实际上加工 1#夹具上的工件时，工作台将移动到最右、下端，也就是工作台下的螺母移动到 *X* 轴的最远端，滑板下的螺母移动到 *Y* 轴的最远端。因此

1#夹具上的工件受热变形影响其实最大；与其相反，9#夹具上的工件在加工位置时螺母距固定端最近，受热变形影响因此最小。

原点位置应靠近电动机的原因与此相同，机床工作一段时间之后丝杠伸长，机床原点产生漂移，距离固定端越远的地方受到的影响越大。此时执行返回机床原点操作，重新建立的坐标系也发生变化，虽然还没有开始加工，夹具在机床坐标系内的位置就已经产生漂移，增大了零件的位置误差。

3. 温度如何影响零件的位置精度？

可以将图 3-2-2 中的工件、夹具、工作台看成一个刚体，即工作台的移动会带动整体一起动。丝杠受热向右伸长之后，孔距 a 与孔距 b 的尺寸也要发生变化，但是由于 a、b 距离较短，影响也小。假设销孔中心是工件坐标系 X 轴在机床冷态时测量的原点位置，丝杠受热伸长之后，原点位置也向右移动 ΔX，此时加工左边的孔时，孔中心到销孔中心的孔距就是 $a+\Delta X$，而右边孔到销孔中心的距离是 $b-\Delta X$。

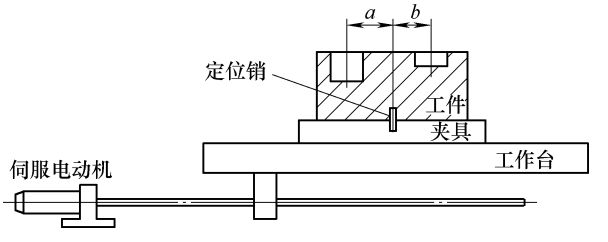


图 3-2-2　X 轴传动示意图

换句话说，定位基准左侧的孔到定位基准的距离增加，右侧相反。

4. 丝杠与螺母出现间隙之后如何提高孔的位置精度？

当丝杠与螺母出现间隙后，进行孔距要求较高的孔加工时，要采取单方向定位的方法。

X、Y 两个轴都会产生磨损，单方向定位就要顾及两个方向，可是在操作时往往忽略起始点的位置，如图 3-2-3 所示。这种走刀路线不能保证 Y 方向的间隙已经消除。

因此要按照图 3-2-4 设置起始点，保证到第一点时，X、Y 两个方向都已经符合单方向定位了。

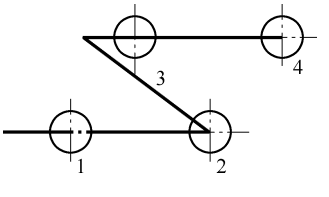


图 3-2-3　仅一个方向符合单方向定位

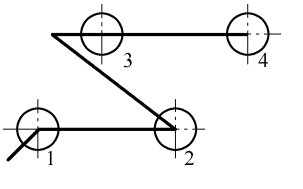


图 3-2-4　两个方向都符合单方向定位

5. 什么是重心驱动？

通过两根滚珠丝杠，将移动结构物的重心保持在两根丝杠之间，这种驱动方式就

是重心驱动，如图3-2-5所示。它可有效抑制振动这一影响高速、高精度的最大因素。

重心驱动的优点如下：

1）抑制振动。重心驱动机械可有效抑制振动，而非重心驱动机械的振动会在很长时间内存在。振动不仅使加工面的表面质量下降，当发生振动时，NC装置将振动检测为偏离指令的动作，从而起动伺服电动机对其进行修正。这将进一步加大振动。

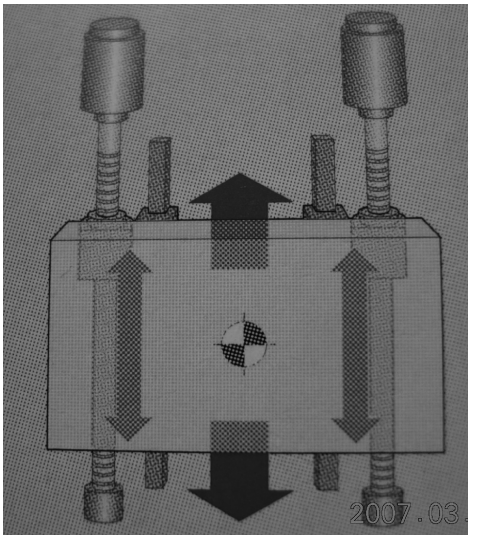


图3-2-5　重心驱动示意图

2）改善圆柱度。在圆切削中的拐点（0°、90°、180°、270°），过去机型在移动方向改变时会产生振动。通过将振动控制在最小程度的重心驱动，可大幅改善圆切削中的圆柱度。

3）提高加工面的表面质量。曲面加工是由非常细微的折线形成的，因此必须在每个折角逐步改变方向。在不降低速度的状态下实现这样的动作需要很大的加速度。在任何加速度的起始点，都会出现与驱动点至重心的距离成正比的旋转振动，在重心驱动中可抑制这种振动，提高加工面的表面质量。

4）卓越的加速性能。重心驱动的机床在加速开始时产生的振动极小，因此开始加速时就可以施加最大的力。非重心驱动机床为了避免加速开始时的振动，只能逐渐加大驱动力。从加速开始至达到最大加速度时的时间差，最终将体现为到达最大速度的时间差。

第三章
建立工件坐标系方面的问题

1. 没有寻边器时如何测量工件在 *XY* 平面的位置?

前文已经介绍过建立工件坐标系首先要进行测量。测量方式分自动与手动两种。手动方式使用的手段有寻边器（包括机械式、光电式）、标准圆柱（包括使用圆柱铣刀等）以及采用抄表的方法。

机械式寻边器可以达到很高的重复精度，大约在 0.002mm，但是与操作者的经验、操作水平有很大关系。由于寻边器本身具有弹性结构，在使用时可以直接与工件接触。双边测量时为了提高测量精度，操作时要注意寻边器在工件的一个方向测量完移动到对边之后，要将主轴旋转 180°，以消除测量系统的误差。重要工件只能单边测量时，也要将主轴旋转 180°再测一次。

没有寻边器时，还可以使用标准圆柱或刃具（以下统称测量棒），为了保护设备、提高测量准确性，要在测量棒与工件之间垫一条塞尺。操作时同样要注意主轴旋转 180°的问题。单边测量计算工件原点时要根据主轴在工件的正、负方向分别减去或加上测量棒半径与塞尺的厚度。

2. 没有对刀仪时如何测量刀具的长度?

刀具长度是从主轴端面开始计算的一个相对值。

方法一：在机床工作台上放置一个平行块，用主轴端面与平行块的上表面接触，操作方法见第二篇第九章第一节“建立工件坐标系”，为了操作方便，建议使用相对坐标。记下坐标并清零，之后把要测量的刀具装在主轴上，再用刀尖接触平行块的上表面，此时相对坐标显示的 Z 值就是刀长。

这里要说的是如果总是在机床上的同一个位置测量（为了避免工作台面上不平点的影响）且使用同一个平行块，就可以将平行块上表面在机床坐标系内的坐标记下来，每次测量刀长时只做上面操作方法的第二步，即直接用刀尖接触平行块上表面，用此时的 Z 坐标值（一定是在机床坐标系内）与记下的数值相减，其绝对值就是这把刀的刀长。

方法二：在已知工件坐标系内、不带刀具长度补偿情况下，将被测刀具装上主轴，然后用刀尖接触工件坐标系 *Z*0 平面。

此时绝对坐标系内 Z 坐标值即为刀具长度，直接输入参数表内即可，此方法的要

点在于必须有准确的工件坐标系平面。

3. 工件坐标系 *Z* 向原点与刀长的关系

设定工件坐标系 *Z* 向原点与设定 *XY* 平面原点的原理相同，但是实际操作方法不同，原因在于加工平面轮廓时，刀具中心的径向偏置（补偿）在 *X*、*Y* 两个方向可能都有且方向不断变化，只有将此偏置（补偿）量加在刀具半径上的方法简便易行；而在每一把刀的使用过程中，刀具长度偏置（补偿）方向与偏置（补偿）值是固定的，因此既可以将此值放在刀具长度参数内，也可以放在工件坐标系 *Z* 向原点参数内，在不同的使用环境下各有方便之处。

工件坐标系 *Z* 向原点的设定主要分为两类，共三种方法，第二篇第十一章第一节所述的关于建立坐标系的方法（方法一）属于第一类，即工件坐标系的 *Z* 向原点坐标是工件原点在机床坐标系内的实际位置；刀具长度是主轴端面到刀尖的距离。加工时执行刀具长度正向补偿，这是最常用的也是最直观的方法，到达图 3-3-1a 所示位置时使用的程序段为“G1 G43 Z0 H1 F100;”，其中 G43 为正向刀具长度补偿，H1 为第一把刀的长度补偿值存储位置。

第二类是将刀具长度与工件坐标系 *Z* 向原点结合在一起使用，分别有以下两种方法：方法二只设工件坐标系 *Z* 向原点，刀长设为 0，因此在加工时不必使用刀具长度补偿功能，但是每一把刀都要分别设定工件坐标系 *Z* 向原点；方法三反过来只设刀具长度，工件坐标系 *Z* 向原点设为 0，如果刀具长度输入的是正值，在加工时要执行刀具长度负向补偿。这两种方法不直观但是操作较简单，下面分别介绍。

方法二：将刀具长度补偿值加在工件坐标系 *Z* 向原点数值中。

操作时把刀具装在主轴上，移动主轴让刀尖轻轻接触工件上表面，记下此时机床坐标系中 Z 的数值并输入工件坐标系 Z 的位置即可。此方法设定的工件坐标系原点比方法一抬高了一个刀长，相当于将刀具长度正向补偿的数值加到了工件坐标系 *Z* 向原点的坐标值上，因此就不用设置刀长的参数了，到达图 3-3-1b 所示位置时使用的程序指令为“G1　Z0　F100”；（对刀位置与此图也相同）。在数控铣的操作中经常使用这种方法。

此方法的缺点是工件坐标系 Z 的原点坐标会随着刀长的改变而改变。但是由于操作简单在比赛时经常采用，尤其在比赛刀柄数量不足，选手需要频繁装刀、拆刀的场合，每个换刀过程都能节约一点时间。

在加工中心的实际生产中也有应用此方法，首先需要选择一把基准刀，其刀长设为 0，用它建立工件坐标系 *Z* 向原点。其余刀具的长度值是与基准刀的差值。这里有三点需注意：一是基准刀要始终放在刀库内，且刀长不改变，一旦因为某种原因需要更换，则刀库内其他刀具长度都要随之改变。二是每次建立工件坐标系时都要使用基准刀。三是使用其他刀具时要使用刀具长度补偿功能。

方法三：工件坐标系 Z 值设为 0。

工件坐标系 *Z* 向原点设置为 0，相当于与机床坐标系 *Z* 向原点重合了。对刀方法与方法二相同，只是将刀尖轻轻接触工件上表面之后机床坐标系中 Z 的数值输入刀具

长度补偿存储器中，要注意此时的刀具长度值与方法一中的刀具长度值的概念和数值是完全不同的，方法一中的刀具长度值是指主轴端面到刀尖的距离，而此时的刀具长度值是“主轴端面沿 -Z 方向移动的距离”，即名义刀长，指令格式为“G1 G44 Z0 H1 F100;”G44 的功能是“负向刀具长度补偿”，执行此程序段后的位置如图 3-3-1c 所示。同样此位置也是对刀时的位置。

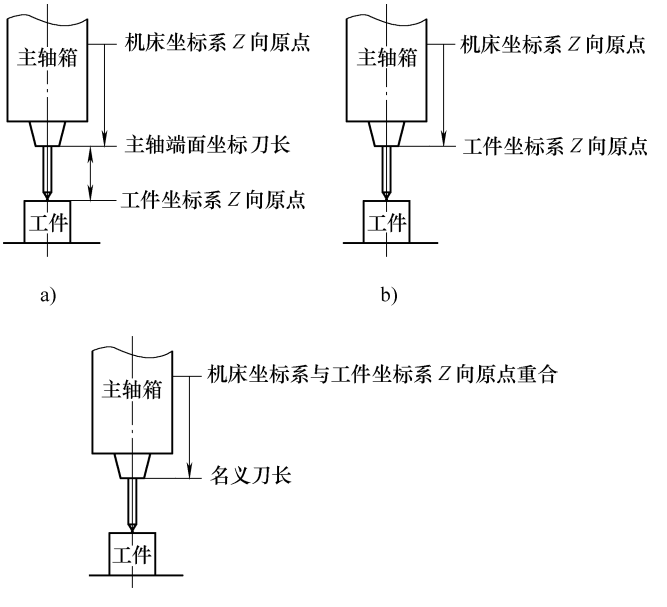


图 3-3-1　工件坐标系 Z 向原点与刀长的关系

小结：在加工过程中，所有的刀尖与工件最终只有一种位置关系，即执行“G01 Z0;”程序段时，刀尖应当刚好接触 Z0 平面。

由于刀具长度是不一样的，在执行“G01　Z0;”时，移动的距离也不同。

方法一是将此变化放在“刀具长度”中；

方法二是将其放在“工件坐标系 Z0”的数值中；

方法三是直接放在刀尖向下移动的距离中。

万变不离其宗，三种方法刀尖移动的距离都是一样的，只不过数值（移动距离）存储位置不同，程序指令格式不同。具体使用什么方法取决于操作场合及习惯。

4. 临时坐标系与局部坐标系有什么区别?

局部坐标系格式：G52　X_　Y_ ;

意义：将当前坐标系（Xx，Yy）位置设定为局部坐标系的原点。或者理解为：工件坐标系的原点漂移到（Xx，Yy）所表示的位置。

返回当前坐标系（或者说取消局部坐标系）的方法：G52　X0　Y0;

特点：1）与主轴位置无关。

2）使用方便，不用往存储器内赋值。

3）若没有取消局部坐标系，则将局部坐标系带入其他工件坐标系。

临时坐标系格式：G92　X_　Y_ ；

意义：（Xx，Yy）为主轴在新设定的临时坐标系内的位置，也就是以主轴在临时坐标系内的坐标来表示临时坐标系。换句话说，临时坐标系的原点在主轴当前位置（－Xx，－Yy）处。

取消临时坐标系：直接断电源（不按急停按钮）。

特点：1）与主轴位置密切相关。

2）使用方便，不用往存储器内赋值。

3）若没有取消临时坐标系，则所有工件坐标系原点都会漂移。

4）特征不明显，使用不熟练时容易出事故。

第四章

刀具准备与使用方面的问题

1. 如何选择加工参数?

合理的加工参数对确保产品质量、提高生产率、降低制造成本、保证数控机床安全运行和提高综合效益是十分重要的。

1）切削深度的选择。粗加工的切削深度应根据工件的加工余量确定，尽量用一次走刀就切除全部加工余量。当加工余量过大、机床功率不足、工艺系统刚度较低、刀具强度不够以及断续切削或冲击振动较大时，可分几次走刀。切削表层有硬皮的铸、锻件，应尽量使切削深度大于硬皮层的厚度，以保护刀尖。半精加工和精加工的加工余量一般较小，可一次切除。有时为了保证工件的加工质量，也可二次走刀。多次走刀时，第一次走刀的切削深度取得比较大，一般为总加工余量的 2/3 ~ 3/4。

2）进给量的选择。粗加工时，进给量的选择主要受切削力的限制。在工艺系统的刚度和强度良好的情况下，可选用较大的进给量。半精加工和精加工时，由于进给量对工件的已加工表面粗糙度值影响很大，因此进给量一般取得较小。通常按照工件加工表面粗糙度值的要求，根据工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度等条件来选择合理的进给量。当切削速度较高，刀尖圆弧半径较大，或刀具磨有修光刃时，可以选择较大的进给量以提高生产率。

3）切削速度的选择。在切削深度和进给量选定以后，可在保证刀具合理寿命的条件下，确定合适的切削速度。粗加工时，切削深度和进给量都较大，切削速度受刀具寿命和机床功率的限制，一般取值较低；精加工时，切削深度和进给量都取得较小，切削速度主要受工件加工质量和刀具寿命的限制，一般取值较高。选择切削速度时，还应考虑工件材料的切削加工性等因素。

2. 功率 – 转矩图有什么作用?

转矩和功率，都是电动机的主要技术参数，功率是指电动机的额定输出，也即电动机转轴上的有效机械功率，单位是 W。转矩是电动机轴端的输出转矩，单位是 N · m。

工程上的近似计算可以使用下面的公式：旋转机械的功率、转速、转矩平衡方程式为：

$$P = n \times M/9550$$

式中　P——旋转机械的功率（kW）；

n——转速（r/min）；

M——转矩（N·m）。

电动机在加速过程中需要额外的转矩，因此，在同样惯量条件下最大转矩越大的电动机的加速性能越好。也可以理解为最大转矩越高，过载能力越好，加速相对较快。

伺服电动机主要按转矩大小分类，一般按照恒转矩输出，转速越高，功率越大。

通过“转速-转矩”图可以了解伺服电动机的基本特性。如图 3-4-1 所示，FANUC 的 αiS 8/4000 伺服电动机，在 0～4000r 可保持 8N·m 左右的输出转矩。

主轴电动机主要按照功率大小分类，一般按照恒功率输出，转速越高，转矩越小。通过“转速-功率”图（图3-4-2）和“转速-转矩”图（图3-4-3）可了解主轴电动机的基本特性。如 FANUC 的主轴电动机 αi8/8000，在 1500r 左右可达到额定功率 7.5kW，直到 6000r 左右开始下降，8000r 时下降为 5.5kW。

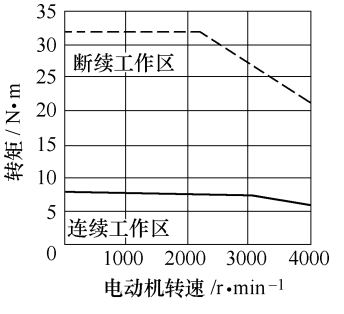


图 3-4-1　伺服电动机转速-转矩图

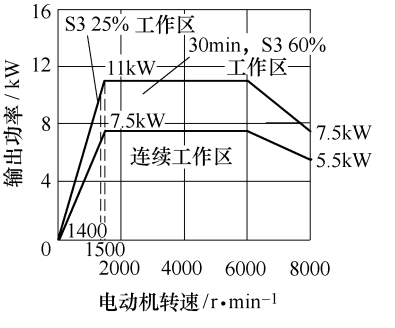


图 3-4-2　主轴电动机转速-功率图

通过图 3-4-3 可知该电动机在从 0 到 1400r/min 的连续工作期间，转矩的最大值大约是 50N·m，也就是说在这个范围之内主轴的力量都一样，在需要大转矩的工作（如：攻大直径的螺纹）时，就可以根据刀具允许的切削速度选择合理的转速。

将图 3-4-2 与图 3-4-3 叠加，就可以得到该型号电动机的功率-转矩图，在主轴转速 1400r/min 左右时，电动机的力量最大，效率也最高。切削参数往往不能正好落在此区间，而是根据工作内容进行选择，比如要想机床发挥出最大效率，主轴转速应当大于 1400r/min 而小于 6000r/min。

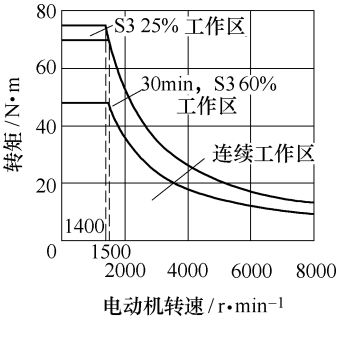


图 3-4-3　主轴电动机转速-转矩图

3. 湿切与干切各有什么利弊？

湿切有效地降低了切削区域的温度，使工件保持在较低的温度变化范围，减少了因为温度引起的内应力。切削液还辅助清理切削区域的切屑，避免切屑进入切削区域，

提高加工表面的质量，并且具备一定的抗氧化作用。但是湿切对环境有污染，而且刀具切削刃在切入与切出时的温度变化剧烈，使切削刃的组织结构发生变化，影响使用寿命。

干切技术是高速加工的产物，干切削就是在切削过程中取消或减少切削液的使用。一方面可以降低加工成本，减少对环境的污染；另一方面虽然在加工区域温度较高，但是刀具材料的耐热能力远远高于工件材料，温度使工件切削性能得到改善，从而提高了刀具寿命和加工效率。

4. 加工中产生振动时该怎么办?

1）选择合理的切削用量，调整切削速度躲避工件的振动区域，进入条件稳定区，减小振动。增大进给量，改变工件和刀具受力，避免产生振动。

2）选择合理的刀具几何参数，刀具的主偏角对刀具受力影响较大，前角直接影响刀具的锋利程度。

3）使用其他装置增加工艺系统刚性，提高系统抗振性。例如增大工件与夹具的接触面积，使用防振刀杆，使用中心架或跟刀架。

5. 同一厂家的立铣刀与键槽铣刀精度一样吗?

立铣刀与键槽铣刀由于结构不同制作工艺也不同，虽然是同一厂家制造，立铣刀的制造公差等级也要高于键槽铣刀。

原因在于立铣刀端面有中心孔，磨削时的状态是夹一端、顶一端，刚性好，磨削的表面粗糙度值小、圆柱度高；键槽铣刀端面是切削刃，只能采用夹持刀柄部分进行磨削，工艺性差，精度就会稍差一点。因此进行精加工时尽量选用立铣刀。

6. 如何选择面铣刀的直径?

面铣刀是平面加工中经常使用的刀具，在平面铣削中非常重要的一点就是刀具尺寸的选择。单次铣削时，面铣刀的直径应当是铣削宽度的 1.3 ~ 1.6 倍。这个时候可以保证切屑顺利排出。当切削面积比较大时，应避免面铣刀从工件的中心开始切削。全宽度平面铣削由于排屑困难，会迅速磨损切削刃并使切屑粘接在刀片上，不但影响切削质量，还会造成刀片报废。

7. 面铣刀的切入角有什么影响?

采用顺铣方式时需考虑切入角。

铣削加工是断续切削，切入角对刀片的寿命有很大影响。面铣刀的切入角是工件边缘与刀具中心到切入点的延长线的夹角。顺时针方向为正的切入角，反之为负的切入角。应该避免刀具中心与工件中心重合，这一中性位置会引起刀具的振颤，使得加工质量较差，应当将刀具中心偏离工件中心线。

切削刃是刀片中最薄弱的部分。切入角为正值时，切削刃的尖角最先接触工件，容易造成切削刃破损，如图 3-4-4 所示。因此尽量不要采用这种方式。切入角为负值时，刀片首先接触工件的部位是底刃上的某一点（取决于切入角的大小），此处强度明显高于刀尖，从而延长了刀片的使用寿命，如图 3-4-5 所示。通常应当让刀具中心在工件区域内，这样就可以保证负的切入角。

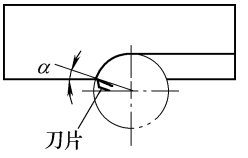


图 3-4-4　正切入角

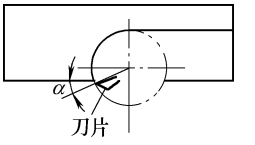


图 3-4-5　负切入角

8. 为什么立铣刀铣出来的槽不对称?

加工位置度要求高的槽时，不能用立铣刀沿中心线直接铣过去。即使立铣刀直径与槽宽要求相符也不行，因为立铣刀会向前进方向左侧偏斜，影响位置精度。

如图 3-4-6 所示，刀具沿 V 向前运动。

在位置 1 切削刃只受到向后的反作用力；在位置 2 向后的反作用力减小，向左的反作用力增大；在位置 3 向后的反作用力为 0，向左反作用力最大；在位置 4 向左的反作用力又减小，向前的反作用力增大；到位置 5 向左的反作用力为 0，向前的反作用力最大。

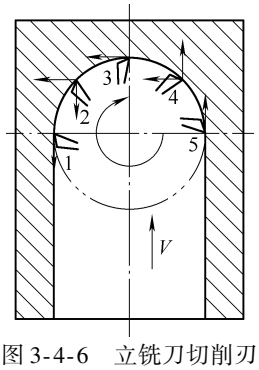


图 3-4-6　立铣刀切削刃受力分析（俯视图）

由此可以看出，刀具在向前移动过程中，始终受到向左的反作用力，使刀具系统产生变形，其大小与进给速度、切削深度成正比。进给越快、切削越深，反作用力越大。

因此在加工位置精度要求高的槽时，一定要用直径小些的刀粗铣一遍，然后按插补的方法铣一个完整的轮廓，这样刀具变形产生的偏移互相抵消，才能保证位置度要求。

9. 铰刀加工之后孔径为什么会小于铰刀直径?

铰刀是一种成形刀具，理论上加工完的孔径是一定的。但是切削速度不合适会导致加工超差。这种情况许多操作者都遇到过，当切削速度过快时，铰刀加工完的孔尺寸超过上限，而此时孔壁都被铰到，也就是底孔并没有钻大。但是当铰刀线速度低于 3m/min 时（如 ϕ8 铰刀转速为 119r/min 时）孔径产生负值扩张量，也就是孔的尺寸小于铰刀的名义尺寸，究其原因，可能是切削速度太低时，由于切削余量本身也不大，在切削刃与工件表面接触时，工件表面发生了弹性变形，并没有把切削余量全部切掉。根据经验，对于钢材，铰削速度在 3 ~ 6m/min 比较合适。不同的机床应当根据其系统刚性适当修改。

10. 精铣时选用 90°的面铣刀还是 45°主偏角的面铣刀?

这两种面铣刀是使用最频繁的，主偏角不同使得刀具在切削时受到的反作用力也不同。比较图 3-4-7 所示的两种主偏角，可以发现 90°主偏角的面铣刀受到的反作用力主要是径向力，其结果使主轴产生水平位移；45°主偏角的面铣刀受到的反作用力除了径向力外，还有向上的轴向力，但是由于结构的限制主轴不能向上移动，于是这个力就向下压工件。此时如果工件系统刚性较差，工件就会发生变形，加工过程产生振动，影响几何公差和表面粗糙度。

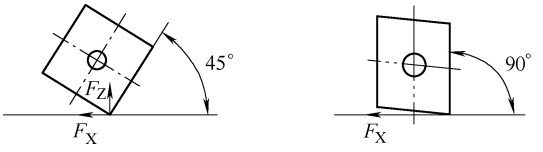
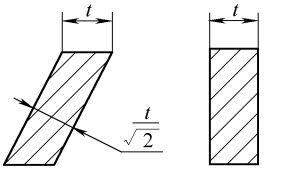


图 3-4-7　两种主偏角

另一方面，主轴轴向承载力高于径向承载力，45°主偏角的面铣刀将一部分反作用力转化为轴向力，正好弥补了径向承载力低的缺陷，因此对于刚性较差的机床或者切削力很大的粗铣，最好使用45°主偏角的面铣刀。

45°主偏角的面铣刀对于保护刀片切削刃、提高刀片寿命也有好处。比较两种铣刀加工出来的切屑，可以发现在加工参数相同的情况下，45°主偏角的面铣刀产生的切屑厚度较薄，如图 3-4-8 所示。其厚度只是 90°主偏角的面铣刀加工出的切屑的 $1/\sqrt{2}$，但是切屑长度长了，也就是切削刃上的每个点所负担的力小了，所以整个刀片使用寿命就提高了。



t—每转每齿进给量

图 3-4-8　两种主偏角刀片加工的切屑截面

11. 修磨后的主轴锥孔哪种状态好?

普通加工中心主轴锥孔修磨后要用标准芯棒进行涂色法检查。一般要求接触面积大于等于 80%，而且希望结合面上下实，中间虚，如图 3-4-9 所示。

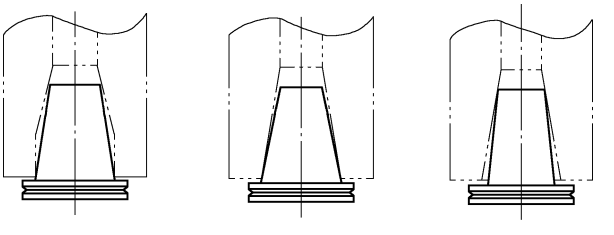


图 3-4-9　刀柄与主轴锥孔的配合情况

如果达不到图 3-4-9a 所示的理想状态，图 3-4-9b 所示的修磨结果次好。因为大端固定后，小端虽然有间隙，但是拉刀力有 1000 ~ 2000kg 或者还要多，小端并不是完全的自由状态。

但是配合结果若如图 3-4-9c 所示，拉刀力虽然会使刀柄某一侧与主轴锥孔的一边接触，但是在相对的方向肯定有微小的间隙，一旦受到比较大的外力，再加上刀尖（受力点）到刀柄小端的力臂要远远大于拉钉（受力点）到刀柄小端的力臂，刀具的回转轴线很容易偏离主轴轴线。其结果会产生振动及噪声，加快刀具磨损，降低表面加工质量，甚至使加工尺寸超差。

第五章
编程类问题

1. G 代码为什么称为“准备功能代码”?

G 代码表示准备功能，该地址的作用就是将控制系统预先设置为某种加工模式或预期的状态。“准备功能”这个术语表明了它本身的含义。例如，G01 将机床预先设置为直线插补的运动模式，也就是说机床准备进行直线插补。

2. 刀具半径补偿为什么会突然取消?

数控系统在进行刀具半径补偿运算时，一般要预读 2 个或以上程序段。否则数控系统不知道下一步如何运行。例如执行完“G01 G41 Y100.0 D01 F200;”这句指令后，主轴停在位置 1，还是位置 2 并不确定，机床要根据下一个移动指令来判断停在哪个位置。如图 3-5-1 所示。向左拐停在位置 1，向右拐停在位置 2。

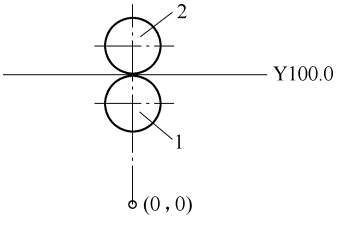


图 3-5-1 刀具半径补偿方向分析

对于 FANUC 系统，如果在编程平面内连续有两个程序段没有移动指令，刀具半径补偿指令将在下一个程序段的起点暂时取消，即“在此前程序段的终点沿移动方向的垂直方向产生长度等于偏置值的矢量”。此时会引起过切。

例如：

```
;
N4 G1 G42  X0 Y0  D01  F200;      (建立刀具半径右侧补偿)
…
N6 G91  G01  X100  Y100;
N7  S300;
N8 G04  X10.0;
N9  X100;
…
```

本来刀具中心应该执行图 3-5-2 所示的轨迹，此时由于 N7、N8 影响了数控系统的运算，产生根切。执行轨迹如图 3-5-3 所示。

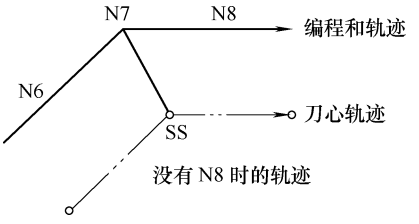


图 3-5-2　连续刀具半径补偿

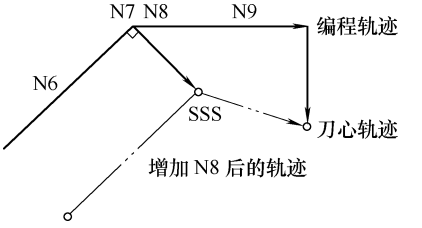


图 3-5-3　刀具半径补偿在一个方向取消

刀具半径补偿是数控机床最重要的功能之一。操作者很多错误出现在使用格式上。必须记住：G41、G42 要编在进入工件轮廓的程序段中，而 G40 要编在从轮廓退出的程序段中。

3. 刀具半径补偿加不上怎么办?

以下是出现这种情况时的一种处理办法。由于子程序的槽形太窄，机床主轴走到槽形中心之后再加刀具半径补偿时机床报警，因此决定在主程序内加上刀具半径补偿。即刀具半径补偿应当加在“N7 Z5;”之后，程序如下所示：

N7 Z5;

N8 G41　X40.575　Y7.799　D8　F60;

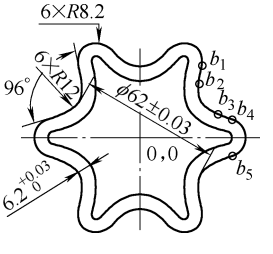
N9 G1 Z－2 F39;

N10　M98　P6351;

N11　M98　P6352　L5;

FANUC 系统在编程平面内连续两个程序段没有移动指令时会造成刀具半径补偿暂时取消。而 N9、N10 恰恰连续两句程序段没有 *XY* 平面内的移动指令，因此机床报警。解决的办法之一是在点（X40.575 Y－7.799）之前增加一点（X38.673 Y－8.417），见表 3-5-1。这样避免了连续两句没有编程平面内的移动，报警就消除了。

表 3-5-1　编程实例



b_1 点坐标 X＝27.041、Y＝31.239

b_2 点坐标 X＝25.501、Y＝23.995

b_3 点坐标 X＝33.531、Y＝10.087

b_4 点坐标 X＝40.575、Y＝7.799

b_5 点坐标 X＝40.575、Y＝－7.799

O6350;		铣宽 6.2mm、深 6mm 的齿形槽
N1	T8;	
N2	M6;	
N3	G0　G90　G54　X35　Y0;	根据 N8 插入的点向左偏移一些,取整即可

（续）

O6350；		铣宽 6.2mm、深 6mm 的齿形槽
N4	G1　G43　Z100　H8　F3000；	
N5	M1；	
N6	S645　M3；	
N7	Z5；	
N8	G1　G41　X36　Y－9.285　D8　F1000；	此点坐标可由节点图中的 *b*3、*b*4 的斜率推出 *X* 坐标取整数 36，计算出 *Y* 坐标 －9.285。若不增加这一点则 N8 之后连续两段没有 *X*、*Y* 平面内的坐标移动，机床不能进行正确的刀具半径补偿而报警
N9	G1　Z－2　F39；	修改 *Z* 值，调用三次本程序，最终达到 6mm 深度
N10	X40.575　Y－7.799；	
N11	M98　P6351；	检查深度，保证尺寸（6 ±0.03）mm
N12	M98　P6352　L5；	
N13	G69　G90　G0　Z100；	
N14	G1　G40　X37.285　Y0；	回到 *R*8.2 的圆心
N15	M02；	
O6351		作为齿形槽旋转单元的子程序
N1	G90　G03　X40.575　Y7.799　R8.2　F39；	
N2	G1　X33.531　Y10.087；	
N3	G2　X25.501　Y23.995　R12；	
N4	G1　X27.041　Y31.239；	
N5	M99；	
O6352		坐标系按增量旋转 60°然后再调用 O6351 的子程序
N1	G68　X0　Y0　G91　R60；	
N2	G90　M98　P6351；	此处 G90 非常重要，若没有将报警“根切”
N3	M99；	

4. 机床编程软件没有极坐标编程时怎么办？

购买进口机床时，有的软件功能是逐项购买的。如果当时没买“极坐标编程”功能，手动编程时就会比较麻烦。操作者可以自行编辑一个宏程序，在使用的时候同样方便。调用主程序 O0010 时填上：

X、Y——极坐标圆的中心坐标。

R——钻孔时工进开始的 *R* 平面位置。

Z——钻孔深度。

F——进给速度。

I——极坐标圆周的半径。

A——第一个孔的起始角度。

B——孔之间的夹角。

H——孔的个数即可，与使用固定循环语句一样。

如图 3-5-4 所示，圆周上排列的孔的位置是用极坐标来表示的，其半径相同，角度增量也相同，任意孔的中心坐标在直角坐标系中可以用下式表示：

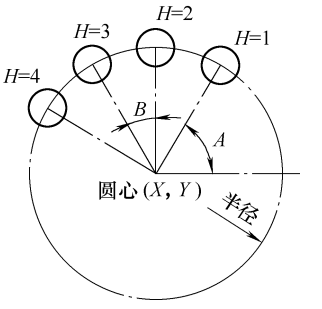


图 3-5-4　圆周分布的孔系

孔位的 X 坐标 = 半径 × COS［极角］

孔位的 Y 坐标 = 半径 × SIN［极角］

图中分布圆半径为 *I*，起始角度为 *A*，间隔为 *B*，钻孔个数为 *H*，圆的中心是（*X*、*Y*）（指令可以用绝对值或增量指定），其子程序如下：

```
O0011;
#3 = #4003;
G81  Z#26  R#18  F#9 K0;
IF [#3 EQ 90]GOTO  1;
#24 = #5001 + #24;
#25 = #5002 + #25;
N1 WHILE[#11  GT  0]  DO  1;
#5 = #24 + #4 × COS[#1];
#6 = #25 + #4 × SIN[#1];
X#5 Y#6;
#1 = #1 + #2;
#11 = #11 - 1;
END  1;
G#3  G80;
M99;
```

主程序为：

```
O0010;
G54  G90  G00  X0  Y0  Z100;
G65  P0011  X100  Y50  R3  Z - 30  F500  I100  A0  B45  H5;
M30;
```

以下为程序中的变量解释，其中：

#4003——存储当前的编程状态，G90 或 G91。

#24——分布圆圆心的 X 坐标。

#25——分布圆圆心的 Y 坐标。

#5001——主轴当前的 X 坐标。

#5002——主轴当前的 Y 坐标。

#1——起始角度。

#2——孔之间的夹角。

#4——极坐标的半径。

#11——孔的个数。

这些变量在使用时都不必管它，计算机会自动读取并运算。

5. 使用坐标系转换功能时的注意事项

数控加工是建立在数学计算即工件轮廓点坐标计算的基础之上。正确地把握数控机床坐标轴的定义，运动方向的规定，以及根据不同坐标原点建立不同坐标系的方法是正确计算的关键，同时也给程序编制带来方便。否则，程序编制容易发生混乱，加工过程也容易引发事故。

下面用一道练习来阐述坐标系转换时的注意事项，如图 3-5-5 所示。

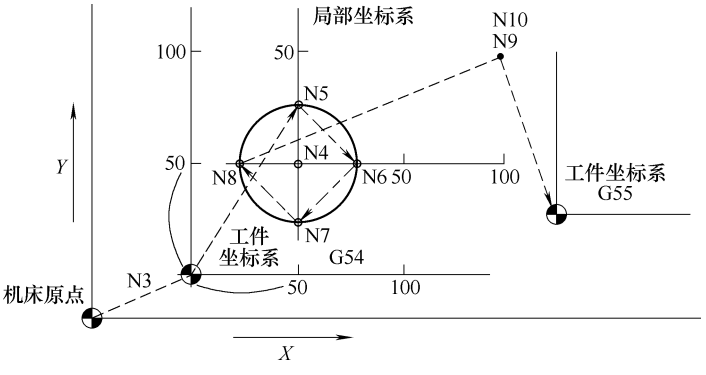


图 3-5-5　坐标系变换示意图

在 FANUC 数控系统中，指令 G52 表示在当前坐标系内，以给出的坐标点为原点建立一个临时坐标系。例如："G52　X310.000　Y－167.000" 表示以当前坐标系中（310.000，－167.000）点为原点，建立一个临时坐标系。取消临时坐标系，返回原坐标系时，执行指令 "G52　X0　Y0;" 即可。现根据下列程序，在表中的空格处填上相应的坐标值。

其中：G54　X＝200.000　　G55　X＝500.0

　　Y＝175.000　　Y＝325.0

程序如下：

N1 G28 G91 Z0;

N2 G28 X0 Y0;

N3 G54 G90 G00 X0 Y0;

N4 G52 X50 Y50;（建立临时坐标系）

N5 X0 Y30;

N6 X30 Y0;

N7 X0 Y－30；

N8 X－30 Y0；

N9 G54 X100 Y50；

N10 G52 X0 Y0；（取消临时坐标系）

N11 G90 G55 X0 Y0；

N12 M01；

顺序号	机床坐标显示		工件坐标显示	
	X	Y	X	Y
N2	0.0	0.0	－200.0	－175.0
N3	200	175	0	0
N4	200	175	－50	－50
N5	250	255	0	30
N6	280	225	30	0
N7	250	195	0	－30
N8	220	225	－30	0
N9	350	275	100	50
N10	350	275	150	100
N11	500.0	325.0	0.0	0.0

本题考查重点有三处：

1）首先 G52 是非移动指令，概念要清楚。其次进入和退出临时坐标系的格式要掌握。

2）在临时坐标系内，工件坐标系不起作用。

3）应知道 G52 与 G92 建立坐标系的不同，重点有两点：

① 用 G52 时，新建立的坐标系与主轴位置无关，仅与当前坐标系有关。

② 用 G92 时，新建立的坐标系与主轴位置密切相关。

使用 G92 后，会引起工件坐标系整体漂移，初学者使用时务必注意。

6. 程序的第一个移动指令可以使用增量编程吗？

如前文所述，增量编程直线时表示的是一个矢量，其大小、方向都是确定的。在调用一个程序执行之前，主轴可能停在任意位置，这样执行增量移动指令就无法保证到达正确的位置。因此主程序的第一个移动指令不能使用增量编程。

调用子程序时，主轴已经停在一个确定的位置，这时就可以使用增量编程了。一般来说，如果没有使用坐标系转换，子程序又无法保证在任意位置都可以重复的，那就必须使用增量编程。

7. 加工阵列排列的 1 万个孔的程序怎么编程？此程序有什么问题？

图 3-5-6 所示为矩阵排列的 X、Y 向间距均为 3mm 的 10000 个孔，通过重复语句、

增量编程、子程序调用就可以很容易完成程序编制。

以下为主程序：

O0010；

G54 G90 G00 X0 Y－3 S3000 M3；

G99 G81 R2 Z－2 F100 L0；（输入钻孔参数但不加工）

M98 P11 L50；（调用 O0011 子程序 50 遍）

G0 G90 Z100；

M01；

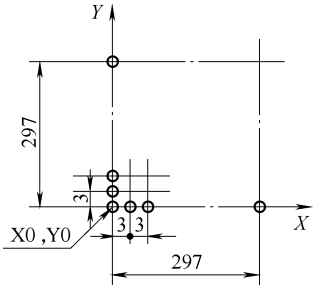


图 3-5-6　1 万个阵列排列的孔

子程序：

O0011；

G91 Y3；　（*Y* 向增量进给 3mm，在此处钻第一个孔）

X3 L99；（*X* 向增量进给 3mm，重复 99 次）

Y3；（*Y* 向增量再进给 3mm，在此处钻下一排第一个孔）

X－3 L99；（*X* 向增量进给 －3mm，重复 99 次）

M99；

短短的 12 行程序段就完成了 10000 个孔的加工内容。如果手工输入这些孔的坐标值，约有 60000B，1s 输入 2B，也要 8.3h。程序编制容易，但是仔细捉摸就会发现这个程序有一个问题，由于是小孔加工容易折钻头，一旦在加工过程中钻头折了，这个程序就没有办法继续执行。此时需要根据具体位置修改程序。因此程序简单和易于恢复是矛盾的两方面，必须综合考虑。

8. 掌握一种系统之后，如何再学习一种新系统？

目前国内数控加工中心上配置的数控系统种类繁多，有进口系统 FANUC、SIEMENS、HEIDENHAIN 等，也有国产系统华中、广数、凯恩帝等，如何在掌握一种数控系统后迅速学习和掌握另外一种数控系统呢？数控系统所控制的通常是位置、角度、速度等机械量以及开关量。从定义上来看可以把数控系统的功能划分为程序编辑模块和机床控制模块。其实所有的数控系统对操作者来说本质是一样的，都是通过 G、M 代码指令来实现机床的运动而达到切削工件的目的，所不同的是它们实现的方法和路径略有差异。SIEMENS、HEIDENHAIN 等数控系统在使用 G、M 代码上有自己的编程标准，而 FANUC 和大部分国产系统等基本遵循国际标准，因此学习另一种数控系统应遵循以下几个方面：

1）寻找、对比两种数控系统机床操作上的差异，从而能够迅速掌握、操作新的数控系统。

2）对比两种数控系统在程序编辑模块常用 G、M 代码上的差异，找出不同部分，结合相同的部分，迅速掌握新的数控系统 G、M 代码编程。

3）学习新的数控系统为优化加工和提高加工效率而开发的专用指令和特殊指令，将其应用于编程中。

4）对于新数控系统中的高级编程指令，需要进行模拟和测试，掌握其编程思想。

要想迅速学习和掌握另外一种数控系统，首先要对新系统有求知的愿望，然后用心研究，不论哪种数控系统，只要真正掌握一种之后再学另外一种，都是比较简单的。

9. 掌握 FANUC 系统后，如何学习 SIEMENS 系统编程？

不管数控机床使用何种数控系统，其加工类型都可以分为三类：轮廓加工、点位加工、曲面加工。就加工中心的编程来说，G 指令也可大致分为三类：轮廓加工命令、孔加工命令和辅助功能命令。学习一种新的数控系统首先要将这三类指令之间的区别搞清楚。

（1）轮廓加工指令的区别　FANUC 平面轮廓加工指令有：

G00　　定位
G01　　直线插补
G02　　圆弧插补 CW
G03　　圆弧插补 CCW

SIEMENS 平面轮廓加工指令有：

G00　　快速移动
G01　　直线插补
G02　　顺时针圆弧插补
G03　　逆时针圆弧插补
CIP　　中间点圆弧插补
G147　　SAR－沿直线进给
G148　　SAR－沿直线后退
G247　　SAR－沿 1/4 圆弧进给
G248　　SAR－沿 1/4 圆弧后退
G347　　SAR－沿 1/2 圆弧进给
G348　　SAR－沿 1/2 圆弧后退

在 G00、G01 的调用上 FANUC 与 SIEMENS 是相同的，只是在坐标轴的赋值时略有差别，在绝对尺寸与增量尺寸混合编程时，SIEMENS 的形式更灵活多样。如

```
FANUC：    G90 X20 Y70 Z100；
           G1 X75 Z32；              （绝对尺寸）
           G91 X40 Z20；             （增量尺寸）
           X－12 Z17；
SIEMENS：  G90 X20 Y70 Z100；
           G1 X75 Z＝IC（32）；（X 尺寸为绝对尺寸，Z 为增量尺寸）
           G91 X40 Z20；
           X－12 Z＝AC（17）；（X 尺寸为增量尺寸，Z 为绝对尺寸）
```

注意：FANUC 只有在变量赋值或运算的时候才能使用“＝”，SIEMENS 在使用字符作为地址代码的时候也允许使用“＝”。

在 G02、G03 圆弧插补中，FANUC 与 SIEMENS 有较大不同，SIEMENS 多出了张角和圆心、张角和终点两种表达方式。

FANUC：$\left.\begin{matrix}G02\\G03\end{matrix}\right\}X_{p}\_\quad Y_{p}\_\quad \left\{\begin{matrix}I\_\ J\_\\R\_\end{matrix}\right\}\quad F\_$

SIEMENS：

G02/G03 X_	Y_ I_ J_	圆心和终点
G02/G03 CR =	X_ Y_	圆心和半径
G02/G03 AR =	I_ J_	张角和圆心
G02/G03 AR =	X_ Y_	张角和终点
G02/G03 AP =	RP =	极坐标和极点圆弧

另外 SIEMENS 还可以使用 CIP 通过中间点进行圆弧插补，已知圆弧起点和终点坐标，再知道圆弧上任意一点，通过这三点定义一段圆弧。

CIP X_ Y_ I1 = J1 = （X，Y 为终点坐标；I1，J1 为中间点坐标）

例如：G90 X30 Y40；

CIP X50 Y40 I1 = 40 J1 = 45；

平滑进给与返回 G147/G148、G247/G248、G347/G348 多用于软件编辑，用来平滑接近轮廓切线方向的开端，控制系统将计算中间点并产生所需的进给程序段。此功能优先和刀具半径补偿（TRC）一起使用。

G147 在轮廓起始点处延长一段直线作为新的起始点

G148 在轮廓终点处延长一段直线作为新的终点

G247 在轮廓起始点处切向延长 1/4 段圆弧作为新的起始点，并生成中间程序段

G248 在轮廓终点处切向延长 1/4 段圆弧作为新的终点，并生成中间程序段

G347 在轮廓起始点处切向延长 1/2 段圆弧作为新的起始点，并生成中间程序段

G348 在轮廓终点处切向延长 1/2 段圆弧作为新的终点，并生成中间程序段

例如：T1；

M6；

G0 X6 Y10；

G42 G147 DISR = 5 X4 Y4 F300；（在起始点处延长 5mm 作为新的起始点）

…

G40 G148 DISR = 5 X10 Y10；（在终点处延长 5mm 作为新的终点）

注意：SIEMENS 有特殊的指令格式，必须注意字符的含义。

（2）孔加工指令 孔加工指令多设定为循环加工指令，FANUC 与 SIEMENS 在循环加工指令的参数设置上有较大不同，在使用时应格外注意。

FANUC：	G80	固定循环取消
	G81	钻孔
	G82	中心钻孔
	G83	排屑钻孔
	G84	攻螺纹

	G85	镗孔
	G86	镗孔
	G87	背镗孔
	G88	镗孔
	G89	镗孔
SIEMENS：	CYCLE81	钻削
	CYCLE82	中心钻孔
	CYCLE83	深孔钻削
	CYCLE84	刚性攻螺纹
	CYCLE840	带补偿攻螺纹
	CYCLE85	铰孔
	CYCLE86	镗孔
	CYCLE87	镗孔 3
	CYCLE88	钻孔时停止
	CYCLE89	镗孔 5

下面以钻深孔为例说明 FANUC 与 SIEMENS 的区别。

FANUC：G83 X_　Y_　Z_　R_　Q_　F_　I_　K_　P_ ；

程序段中每一个字符都有指定的含义，所以不能重复写入，但是可以省略，省略后该项值为上一次的数值或从系统参数中调用默认值使用。

SIEMENS：CYCLE83 （RTP，RFP，SDIS，DP，DPR，FDEP，FDPR，DAM，DTB，DTS，FRF，VARI）

RTP	返回平面（绝对值）
RFP	参考平面（绝对值）
SDIS	安全间隙（无符号）
DP	最后钻孔深度（绝对值）
DPR	相对于参考平面的最后钻孔深度（无符号）
FDEP	起始钻孔深度（绝对值）
FDPR	相对于参考平面的起始钻孔深度（无符号）
DAM	递减量（无符号）
DTB	最后钻孔深度时的停顿时间（断屑）
DTS	起始点处和用于排屑的停顿时间
FRF	起始钻孔深度的进给率系数（无符号）
VARI	加工类型：断屑 =0，排屑 =1

SIEMENS 需要记忆的参数明显比 FANUC 的多，并且参数之间不可混乱冲突。SIEMENS 在循环指令编辑时有图形编译功能辅助，会使编程相对容易些，但阅读仍然较为困难，需重点记忆。在编辑 SIEMENS 的固定循环时，一定要注意参数的前后顺序不能改变，必须遵守参数定义的顺序。如果要在程序中省略某个参数，需要使用逗号（即

“＊＊＊,, ＊＊＊”）来占有空间，不能使用“0”来占有空间，更不能有多出的参数，否则将导致错误的动作并产生报警。FANUC 所有固定循环命令均为模态指令。SIEMENS 在调用模态指令时，要在固定循环前加入指令 MCALL。在加工循环结束后，再次执行 MCALL，取消模态调用。

例如：CYCLE83（155，150，1,，145,，50，20，1，1，0.5，1）

返回平面（绝对值）	155
参考平面（绝对值）	150
安全间隙（无符号）	1
最后钻孔深度（绝对值）	空
相对于参考平面的最后钻孔深度（无符号）	145
起始钻孔深度（绝对值）	空
相对于参考平面的起始钻孔深度（无符号）	50
递减量（无符号）	20
最后钻孔深度时的停顿时间（断屑）	1
起始点处和用于排屑的停顿时间	1
起始钻孔深度的进给率系数（无符号）	0.5
加工类型：	排屑

注意：应仔细阅读各项循环参数，了解其含义后再进行编程操作，以免发生危险。

（3）辅助功能指令　在辅助功能指令中最长使用的是刀具补偿指令，FANUC 主要有刀具长度补偿（G43/G44/G49）和刀具半径补偿（G40/G41/G42）两类，在调用长度补偿或半径补偿指令的同时，要将刀具的长度参数或半径参数的地址代码输入系统，来满足系统的运算条件。每一把刀具对应的只有一个长度参数和半径参数。SIEMENS 同样有刀具长度补偿和刀具半径补偿两类，但是在主轴调用刀具后，刀具的长度补偿参数立即生效。SIEMENS 系统为每把刀具匹配了 1～9 组数据组供补偿使用，使用 H/D 加相应的序号可以使不同的刀长或刀沿生效。如果没有编辑 H/D 值，则 H1/D1 值自动生效，输入 H0/D0 可以使长度或半径补偿值无效。在刀具半径建立与取消时，FANUC 与 SIEMENS 是相同的，都是只有在 G0、G01 的程序段中进行，在 G02、G03 的程序段中会出现报警。

在辅助功能指令中，比较常用的几个功能有极坐标、局部坐标系、坐标系旋转、比例缩放、可编程镜像，这些都是非常实用的功能，可使编程大大简化。

FANUC：

G15	极坐标取消
G16	极坐标建立
G52	局部坐标系
G68	坐标系旋转有效
G69	坐标系旋转取消
G50	比例缩放取消
G51	比例缩放有效

	G50.1	可编程镜像取消
	G51.1	可编程镜像有效
SIEMENS：	G110	极点定义，相对于上次编程的设定位置
	G111	极点定义，相对于当前工件坐标系的零点
	G112	极点定义，相对于最后有效的极点，平面不变
	TRANS	可编程零点偏移，清除所有偏移、旋转、比例、镜像指令
	ATRANS	可编程零点偏移，附加于当前指令
	ROT	可编程旋转，清除所有偏移、旋转、比例、镜像指令
	AROT	可编程旋转，附加于当前指令
	SCALE	可编程比例系数，清除所有偏移、旋转、比例、镜像指令
	ASCALE	可编程比例系数，附加于当前指令
	MIRROR	可编程镜像功能，清除所有偏移、旋转、比例、镜像指令
	AMIRROR	可编程镜像功能，附加于当前指令

FANUC 与 SIEMENS 这些功能的名称不同，但是概念是相同的，使用上也基本一致，即指令加上相应的参数值。FANUC 在这些功能混合使用时，会造成系统负担过大而无法计算。如 G16 与 G68 不可同时指定。SIEMENS 由于运算能力强大不受此限制，都可以附加在当前的指令内，但需要使用特殊指令 ATRANS、AROT、ASCALE 和 AMIRROR。

在宏变量赋值方面，FANUC 使用“#”加数字表示变量，加工程序中在坐标轴后直接引用变量号，如“X#1”。如果变量之间有运算，则需要用中括号将表达式扩起来，如 X[#1 + #2]。

SIEMENS 系统使用“R”作为变量符号，使用“R”加数字（0 ~ 299）表示变量。在给坐标轴赋值时需要使用等式，如 X = R2。变量之间遵循数学运算规则，括号内的优先进行运算，先乘除法后加减法。并且将宏程序的开头和结尾使用不同的字符标注出来，并使用 GOTOF 向前寻找标志字符，使用 GOTOB 向后寻找标志字符，完成宏程序的循环。

将以上主要指令之间的不同点区分清楚，就对于新的数控系统程序编制有了初步的掌握，可以上机床进行试验操作，进一步验证两种数控系统之间的区别。逐渐地深入了解新的数控系统后，再对专用指令、特殊指令等高级指令进行学习。

10. 如何选择刀具路线？

刀具路线是刀具在整个加工工序中相对于工件的运动轨迹，它不但包括了工序的内容，而且也反映出工序的顺序，对零件的加工质量、加工效率有直接影响，应根据零件的结构特点和工序的加工要求等合理安排。在确定刀具路线时，主要应遵循以下原则：

1）应能保证零件的加工精度和表面粗糙度要求。

2）应使走刀路线最短，减少刀具空行程时间，提高加工效率。

3）尽量减少抬刀。

4）选择合理的切削深度、进给量和切削进给速度，最大化地提高金属去除率。

5）优化刀路，走简单的刀路，尽量减少拐角路径，以圆弧过渡代替直线拐角。

6）尽量选择 2D 刀路，2D 刀路要比 3D 刀路效率高。

7）尽量保持刀具对工件材料的常量切削，避免切削时的切削量不均匀。

8）使用大直径刀具去除大部分的材料，而在局部狭窄区域使用小直径刀具进行补加工，避免使用小直径刀具全程加工。

11. 如何减少空行程？

在机床加工工件的过程中，刀具切入工件之前，往往有一段空行程。为了提高效率，减少空切时间，希望刀具在空行程以较高的速度进给，在刀具接触工件前的瞬间，由空行程时的快速进给转变为较慢的工作进给。

1）合理安排工序步骤，有多个加工部位时采取“由近及远”的加工策略，使走刀路线最短，减少刀具在不同加工部位之间来回运动，以减少刀具的空行程。

2）尽量减少抬刀，在保证切削安全的前提下尽量不抬刀，或抬刀的距离最短。

3）合理安排切削深度，尽量减少抬刀次数。

4）合理选择刀具路径，尽量避免刀具运动时的“空切削”。

5）合理选择刀具，避免切削刀具直径过小而造成的切削次数增加。

12. 机械手随机刀库安装大直径刀具时如何完成自动换刀？

有一种带机械手的刀库，其刀号与刀袋号不固定的，这种刀库结构简单，在立式加工中心上使用普遍。由于刀具返回刀库是随机的，对于相邻刀位不能安装刀具的大直径刀具在自动换刀时就有问题，于是有的操作者采取手动的方式换刀，实际上由于这种刀具只能安装在固定的刀袋内，编程时适当增加步骤也可以完成自动换刀。

其思路为：大刀装到主轴上的同时有另一把刀换回到大刀原来的位置，大刀使用完毕换下一把刀之前，增加一次换刀动作，让大刀与前一把刀交换，这样大刀就又回到初始位置，实现了安全的自动换刀。

假设 2#刀袋装的是大刀 T2，之前使用的刀是 T6，之后要调用的刀是 T11，则程序应当这样编制（加工内容省略）：

```
…；
T6；
M6；
…；
T2；
M6；
…；
T6；
M6；
T11；
```

M6；

…；

13. 智能轨迹控制有什么作用？

数控机床的加工能力除了硬件本身的条件以外，和控制系统也有很大关系。智能轨迹控制 IPC（Intelligent Path Control）包括：

1）出色的驱动响应。

2）速度控制最优化、加工能力最大化的先进的软件。

3）加工过程中的高速数据处理和传送。

这些特色结合在一起，就提高了高速加工的精确性。智能轨迹控制的作用如图 3-5-7 所示。

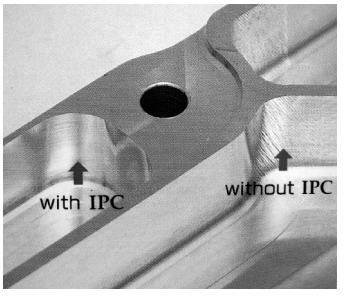


图 3-5-7　智能轨迹控制的作用（左边箭头处使用 IPC）

第六章
操作类问题

1. 开机时为什么要返回机床参考点?

只有采用增量编码器的机床在开机时需要返回机床参考点。

返回参考点的目的首先是建立机床坐标系。由于坐标轴、坐标方向已经确定，所以返回参考点就是确定坐标系的原点，也就是建立机床坐标系。其次是丝杠螺距误差补偿的需要。丝杠是有制造误差的，为了提高加工精度，丝杠被人为分成若干个小区间，激光干涉仪事先测量了每个小区间的误差并将其储存在丝杠误差存储器中，当螺母移动过各个区间时自动修正这个误差。只有知道螺母在丝杠上的准确位置，数控系统才能够进行正确的螺距补偿。

2. 分度值与最小移动距离是一回事吗?

分度值是数显装置上小数点后的最后一位，它体现了系统理论上的控制精度，对于普通加工中心是0.001mm，但是这并不意味着这台机床就可以用手摇脉冲发生器每个脉冲向前移动1μm，尤其是在机床重载荷时更不可能。这是由传动系统的间隙、传动件之间的摩擦力以及驱动元件的刚性综合造成的。

在工作台为1500mm的机床上均匀摆放1t的载荷，用激光干涉仪检测，使用手摇脉冲发生器每次转动1格（0.001mm）。得出的结果是发出1个脉冲时机床没有移动，发出2个脉冲后机床移动了0.002mm，在X、Y轴两个方向重复多次结果均相同。

这个试验带来的启示是数控机床在自动运行时精度完全可以信赖，只是在手动找正时，移动0.001mm的意义不大，此时杠杆表指针的变化可能是外界振动或测量系统弹力释放产生的，抡表找正孔中心时如果表针指示相差0.002mm，就基本可以认可。

3. 硬限超程之后怎么办?

数控机床在工作当中出现硬限超程报警，一般是由两种情况造成：

1）开机未回零，直接执行轴移动，撞硬限位开关。

2）回零开关已经损坏，无法发出正常信号，在正常操作过程中撞硬限位开关。

解决方法：对于硬限超程，则表示行程开关碰到了超程位置处的行程挡块。机床撞硬限位开关后，强电关闭，出现急停状态。按下机床操作面板上的“超程解除”键并保持不放，同时在手动或手轮方式下按住相应的轴的反方向键，再按 < Reset > 键消除报警，使工作台（铣床）向超程的反方向移动，移开限位开关即可。注意一定弄清楚方向，否则会将限位开关压死而造成开关损坏。

如果限位开关被压住，同时机械部分被顶死，用“超程解除”键的方式不能移动

轴，对没有抱闸装置的轴（如立式加工中心机床的 X、Y 轴）可以采取机械解决方法。即将机床完全关机，并将相应轴的防护罩拆卸开，手动转动丝杠将轴移开硬限位开关位置，检查回零开关是否完好。然后将防护罩安装恢复成原状，故障解决。

4. 刀库乱了之后该怎么办?

加工中心机床最重要的部分之一就是刀库，利用自动换刀功能可以节省人力和物力。数控系统控制换刀过程和刀库交换数据过程，换刀大体上分两种方式：随机方式换刀和唯一对应方式换刀。对于随机换刀方式是指刀号与刀套号不是一一对应，数控系统只认刀号，对于刀盘上的刀套号并不参与控制，一般应用于小型刀库机械手换刀机构，数控系统在换刀过程中只采集刀号信息，此种方式即使刀具更换错误，对换刀过程而言不会造成机械撞击等故障；而唯一对应换刀方式是刀号与刀套号必须一致并且对应，如果不对应会造成刀具之间碰撞的故障，一般应用于斗笠式换刀机构及大型刀库。

当发现刀号出现混乱或者由于机械故障刀库夹刀造成刀号不对应时，该针对不同换刀方式分别解决，每个机床厂家对于此故障会在《使用说明书》当中给出解决的方法，本书只是说明原理。

1）唯一对应换刀方式：将系统上的刀号清零，并从主轴上将刀具取下放置到正确刀具位置。检查刀号是否和刀套号一致，如果一致就可以继续换刀。

2）随机换刀方式：需要将刀具表恢复成初始状态，步骤如下：将所有刀具利用换刀功能换到主轴上，并将刀具一一取下，找到数控系统相应的刀具表的位置，如 FANUC-0IMD 系统的 D 参数中，如果刀具是从 D100 开始排序，就将 1 号刀赋值给 D100，2 号刀赋值给 D101，依此类推将所有刀具赋值为初始状态（SIEMENS 系统可能是用参数将刀具表赋值为初始状态，需要参考机床厂家维修手册），然后利用换刀功能将 T1 号刀具调到主轴上，依次将刀具安装到刀库上。

图 3-6-1 所示为 FANUC 系统参数表，图 3-6-2 所示为 SIEMENS 系统参数表。

图 3-6-1　FANUC 系统参数表

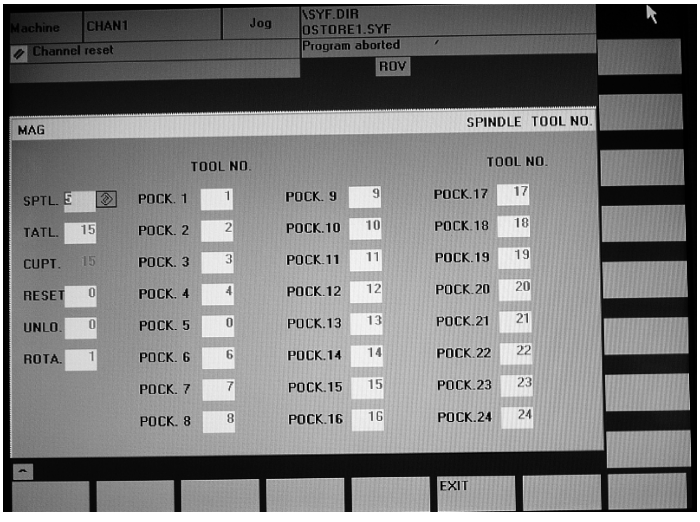


图 3-6-2　SIEMENS 系统参数表

5. 测量方法对三坐标测量机的测量结果有什么影响?

使用三坐标测量机时需要注意测量方法的选择。

在测量尺寸误差方面三坐标测量机有它独有的优势，如测量单一元素时结果很准确，比如测量直径、距离、圆柱度等，但在测量由两个或三个元素综合在一起形成的形状或者位置误差时就要分析验证测量方法。

例如测量一个 ϕ385mm 圆柱孔与一个 ϕ506mm 孔的端面的垂直度。圆柱孔的深度是 20mm，而与之一起评价的 ϕ506mm 孔端面是宽度为 60.5mm 的一个圆环。如果用圆柱孔作基准来计算圆环面对圆柱孔的垂直度，结果为 0.0374mm，与要求的 0.01mm 相比已经超差。但如果用 60.5mm 宽的圆环面做基准来评价圆柱孔对圆环面的垂直度时，结果仅为 0.0039mm，符合公差要求。同样是这两个元素但结果相差接近十倍。原因就在于选择了不同的基准。

一般评价时如果基准较大且本身形状精度较高、表面粗糙度值较小则准确度就高，相反准确度就低，尤其是基准尺寸的影响最大。当对测量结果有疑义时可以转换一下评价基准或者用其他方法来验证评价结果的正确性。如垂直度可以用与其他面的平行度来验证；同轴度可以用与其他面的距离来验证。

6. 在卧式加工中心上铣孔时入刀位置对加工有什么影响?

在卧式加工中心上加工一个孔是较常遇到的，需考虑入刀位置。

在卧式加工中心上铣削孔，如图 3-6-3 所示，若将入刀点选在 a 处，当插补快结束时，若选择的是顺铣，即刀具走逆圆，切削刃与滞留在 a 处的切屑相挤切会产生巨大的噪声，造成切削刃严重磨损。尤其是台阶孔或者不通孔，问题更突出。因此正确的加工路线应当是从 a、c 之间入刀，例如选择 e 处，采用逆时针方向进行插补。避免在积屑较多时经过 a 点。

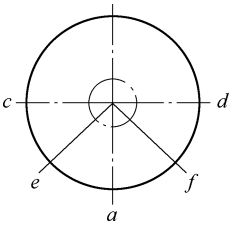


图 3-6-3　卧加上铣刀的入刀位置示意图

另外，这种情况下采用逆铣要比顺铣好一些，可以选择从f点入刀，刀具走顺圆进行逆铣。

第七章
维修类问题

1. 如何查看报警信息?

当机床出现报警时，会在系统的显示屏上出现报警信息，包括报警号和信息简要说明。每个系统厂商报警显示不同，FANUC 系统分为两种级别的报警：红色报警提示和黑色报警提示。当出现红色报警提示时一般机床处于比较高的报警级别，必须解决后机床才能工作。而黑色报警提示属于提示性报警，一般机床能正常工作，只是提醒操作者需要做维护保养等。当出现报警时，按机床面板上 < ALARM > 键，就可以进入到报警信息显示画面，根据报警号查询维修手册中报警内容及解决方法。FANUC 系统报警显示如图 3-7-1 所示。

图 3-7-1 FANUC 系统报警显示

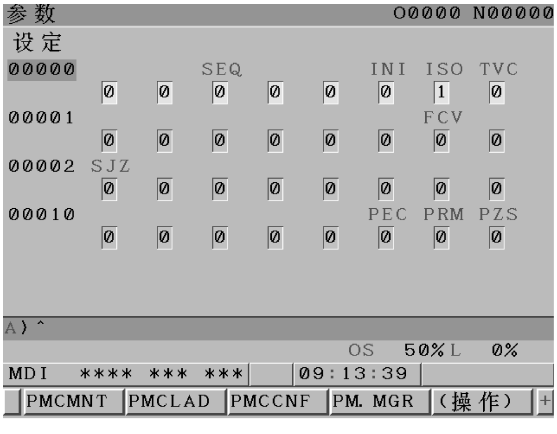
SIEMENS 系统报警显示如图 3-7-2 所示。

当出现报警信息后查询维修手册，如果可能还需要电气原理图样，一般情况下可能是外部某些开关量出现故障，此时需要在数控系统上的画面查询输入输出点是否正常，动作是否正常执行。以 FANUC 0i-MD 系统为例说明如下：

PMC 的诊断分为动态和静态两种，在诊断时一定先确定 PMC 处于运行状态。

按 < SYSTEM > 键→按扩展键→按 < PMCMNT > 键→在画面下方输入信号点（根据电气原理图样），例如 X3.0→按 < 搜索 > 键，如图 3-7-3 所示。

图 3-7-2　SIEMENS 系统报警显示



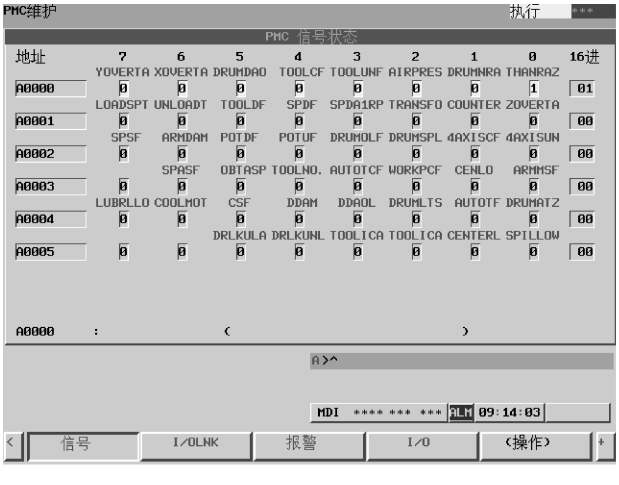


图 3-7-3　FANUC PMC 诊断显示

SIEMENS 系统与 FANUC 系统在查询方面的区别是 SIEMENS 系统需要进入到 I/O 状态表，手动输入相应的信号查询。

按 < MACHINE > 键→按 < 诊断 > 键→按 < PLC 状态 > 键→在画面左侧栏输入信号，例如 I33. 3→按 < 接受 > 键，SIEMENS 系统报警显示如图 3-7-4 所示。

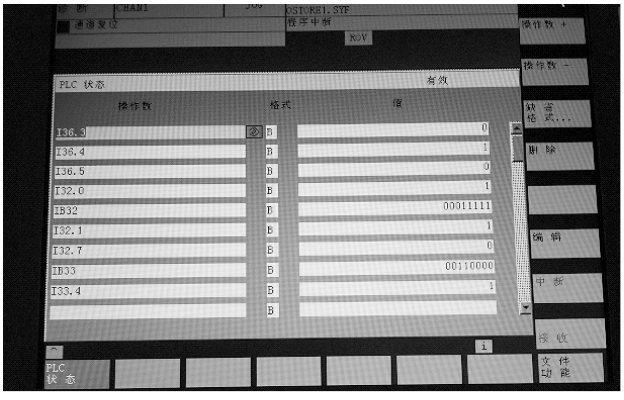


图 3-7-4　SIEMENS 系统诊断显示

2. 如何根据梯形图检查故障点?

具有一定电气设计和维修水平的人员还可以根据 PLC 的梯形图（图 3-7-5）检查故障点，此方法对 FANUC 系统比较有用，SIEMENS 系统一般不能在线显示 PLC。

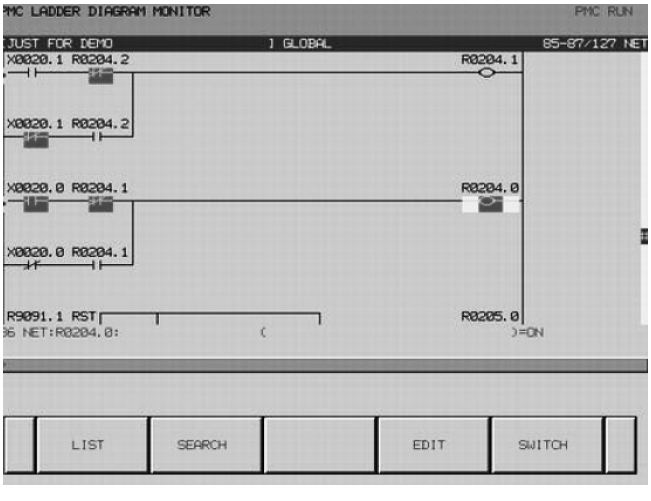


图 3-7-5　FANUC 系统梯形图

操作方法：按功能键 < SYSTEM > 切换屏幕→按 < PMC > 键，再按相应的键，便可分别进入 PMCLAD（梯形图程序显示功能）、PMCDGN（PMC 的 I/O 信号及内部继电器显示功能）、PMCPRM（PMC 参数和显示功能）。动态地进行监视 LADDER 运行。

1）通过梯形图进行直接诊断，查看相关点的接通/关断（ON/OFF）状态。

通过不断查找相关联的点，直到查出不输出的原因。

2）通过集中监控画面（COLLECTIVE MONITOR）集中查看相关点的变化情况（集中监控功能是把相关的 PMC 集中放在一个画面中进行诊断，而不用全篇查看）。

① 按下 < SEARCH > 键会出现图 3-7-6 所示的画面。

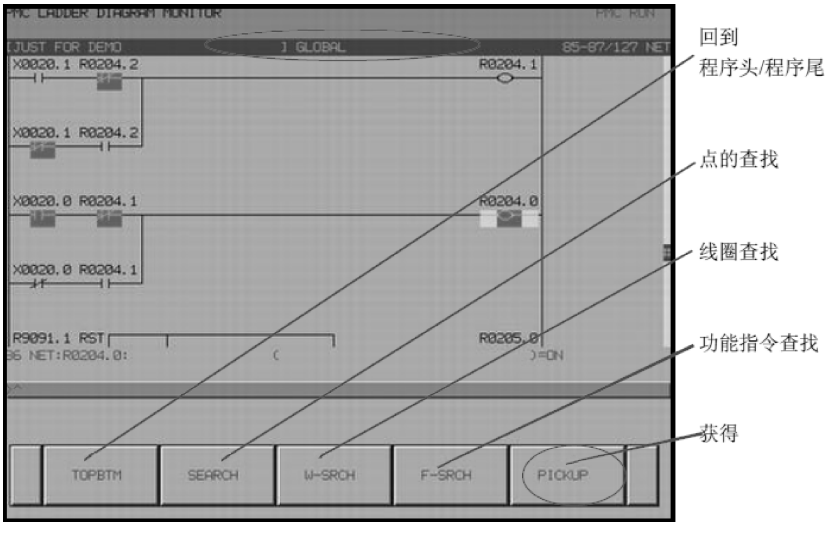


图 3-7-6　FANUC 系统如何进入集中监控

找到需要监控的点，按下 < PICKUP > 键。

② 按 < ▲ >（上翻键），然后按下 < SWITCH > 键，即可进入集中监控画面，如图 3-7-7所示。

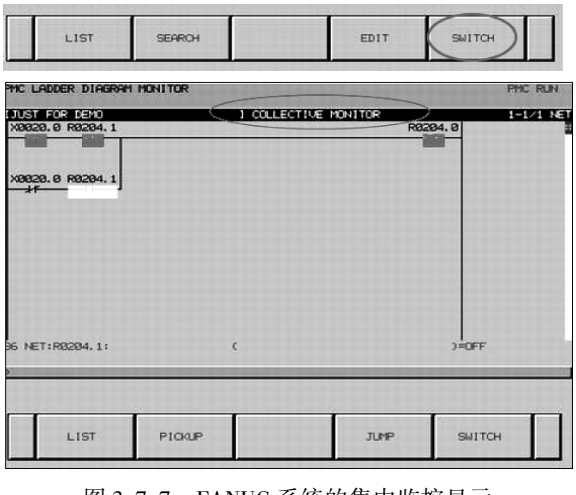


图 3-7-7　FANUC 系统的集中监控显示

小技巧 1：FORCE（强制输出）功能的应用。

使用系统 PMC 提供的 FORCE 功能，在硬件 I/O 点没有连接，模块没有分配的情况下对 *X/Y* 进行强制输出，也可以对没有处理过（即梯形图中没有该信号的输出线圈）的 G、R、D、K 信号进行强制输出。要使用该功能应先将“编程器操作允许”打开，按 < PMC > → < PMCPRM > → < SETING > 键，显示图 3-7-8 所示的画面。

图 3-7-8　打开“编程器操作允许”

按 < PMC > → < PMCDGN > → < STATUS > → < FORCE > 键，查找相关的输出点按下 < ON > 或 < OFF > 键即可对该点进行强制输出，如图 3-7-9 所示。

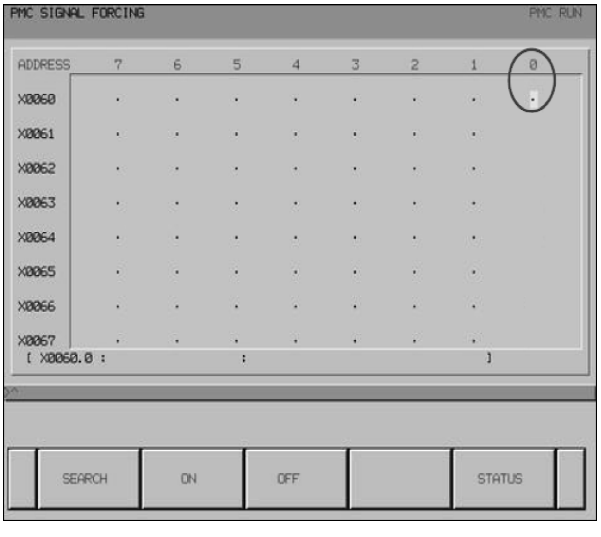


图 3-7-9　选择相关的点进行强制输出

应用实例：一台日本立式加工中心使用 FANUC 18i 系统，报警内容是“2086 ABNORMAL PALLET CONTACT（M/C SIDE）”，查阅机床说明书，意思是“加工区侧托盘底座异常”，检测信号的 PMC 地址是 X6.2。该加工中心的 APC 机构是双托盘大转台旋转交换式，观察加工区内堆积了大量的铝屑，所以判断是托盘底部堆积了铝屑，导致托盘底座气检无法通过。但此时报警无法消除，不能对机床作任何的操作。在 FANUC 系统的梯形图编程语言中规定，要在画面上显示某一条报警信息，要将对应的信息显示请求位（A 线圈）置为 1，如果置为 0，则清除相应的信息。也就是说，要消除这个报警，就必须将与之对应的信息显示请求位置为 0。按 < PMCDGN > → < STATUS > 键进入信号状态显示屏幕，查找为“1”的信息显示请求位时，查得 A10.5 为 1。于是，进入 PMCLAD（梯形图程序显示画面），查找 A10.5 置位为 1 的梯形图回路，发现其置

位条件中使用了一个保持继电器的 K9.1 常闭点，此时状态为 0。查阅机床维修说明书，K9.1 的含义是：置 1 时为托盘底座检测无效。

故障排除过程：在 MDI 状态下，用功能键 < OFFSET SETTING > 切换画面，按 < SETTING > 键将“参数写入”设为 1，再回到 PMCPRM 画面下，按 < KEEPRL > 键进入保持型继电器画面，将 K9.1 置位为 1。按报警解除按钮，这时可将 A10.5 置为 0，便可对机床进行操作。将大转台抬起旋转 45°，拆开护板，果然有铝屑堆积，于是将托盘底部的铝屑清理干净。将 K9.1 和“参数写入”设回原来的值 0。多次进行 APC 操作，再无此报警，故障排除。

小技巧 2：交叉点编辑。

因为操作者对机床的梯形图并不熟悉，有一些信号点在梯形图中多个地方使用，这个时候使用交叉点编辑，可以很方便地寻找出所编辑的信号或功能指令在梯形图中的相应的位置。也可用于梯形图中双线圈的检查。

操作方法：按 < PMC > → < EDIT > → < CROSS > 键 。

3. 同类交换法及其使用注意事项

同类交换法就是当数控机床出现报警时，如果不好判断是哪个硬件出现故障，可以用相同的硬件交换来判断，最常用的应用实例是伺服或者反馈环节出现故障后的处理办法。一般 *X*、*Y* 轴的硬件配置都是一样的，可以通过交换的方式判断是哪部分硬件出现故障。但是应注意以下事项：

1）电气操作需要由专业的维修人员进行。

2）硬件更换应该在关机的状态下进行，不能带电操作。

3）更换硬件时需要做记录。

案例：有一台立式加工中心机床使用的是 SIEMENS 840D 数控系统，在使用中出现 *X* 轴运动报警，根据报警内容应该是 *X* 轴反馈环节出现硬件故障，在反馈环节包括伺服驱动器，*X* 轴电动机反馈线和 *X* 轴电动机三个部分，在现场没有多余的硬件进行更换来判断到底是哪个具体备件出现故障，这个时候就可以用同类交换法来判断故障。

对于此类机床 *X* 轴和 *Y* 轴的硬件配置都是一样的，可以先将 *XY* 的反馈线和动力线从伺服驱动器上作交换，相当于 *X* 轴驱动器控制 *Y* 轴电动机，*Y* 轴驱动器控制 *X* 轴电动机，经过交换后如果报警还是显示 *X* 轴故障，说明 *X* 轴的驱动器有问题；如果报警显示转换到 *Y* 轴上，说明 *X* 轴反馈线或者电动机有问题，驱动器是正常的。依此方法可以初步判断哪部分硬件出现故障。

同类交换法使用的前提是对机床的原理控制比较清楚，先从容易更换的部件开始判断，同时在更换线时要做记录以避免线路接错造成更大的故障。

4. 参数丢失之后怎么办?

数控机床出厂时都有出厂参数，建议客户在机床调试完毕后先将原始参数备份归档，当出现参数丢失后可以及时恢复。

数控机床参数丢失可能由以下几种情况造成：

1）机床长期放置不使用。现在数控系统内的参数都是存放在主板上的芯片中，主

板上装有锂电池，如果机床正常开机使用会自动给锂电池充电，如果长期不使用机床建议一周开机一次给锂电池充电。

2）数控系统内的充电电池损坏，需要更换。这种情况应该是机床使用很长时间了，一般系统会有电池电量低的提示报警，这个时候就要求及时更换电池，一般情况下是需要在开机的状态下更换系统电池。具体的操作方法需要查阅相关数控系统的使用说明书。

3）外部干扰源造成参数丢失。

解决方法：当系统参数丢失后先找初始参数文件恢复。如果没有初始参数文件，对于 SIEMENS 802D 系统而言，可以用如下方法：开机后有个 < 启动 > 键，按 < 按缺省值上电 > 键，就可以调出出厂时的备份参数到系统缓存中。而其他数控系统，如 FANUC 系统等可以找到同类机床的参数先恢复，唯一需要修改的只有换刀位置、准停位置等有限的几个参数，在现场重新调整就可以使用。

示例 1：参数的备份与恢复（FANUC 0i-MD 系统）。

1）合上机床总开关，把操作面板上的急停按钮锁紧（注意，在伺服参数、主轴参数没有调整完毕的情况下，不要打开急停按钮，以免发生意外）。

2）用存储卡进行 PLC 程序的备份和恢复。

① 切断 NC 电源（电源开关一般位于操作站的侧面），把存储卡插入显示器左侧的存储器插槽中（请注意存储卡插入的方向）。

② 按住系统显示器下方最右端的两个按键后接通 NC 电源，直至显示图 3-7-10 所示的 BOOT 系统菜单画面。

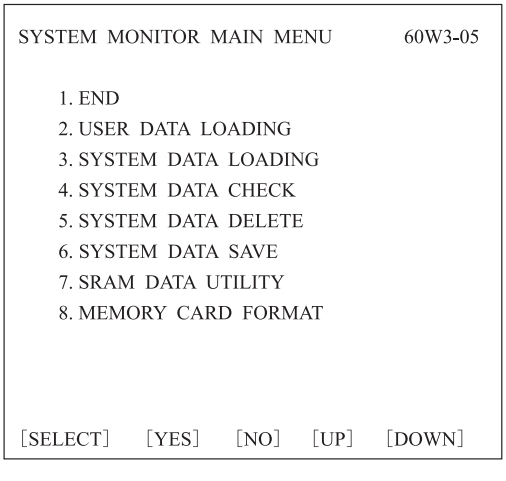


图 3-7-10　BOOT 系统画面下的数据存储区

③ 按 < DOWN >、< SELECT > 键选择到“2・USER DATA LOADING”选项，按 < UP >、< DOWN > 键查找相关的 PMC 文件，即系统参数文件，然后按 < SELECT > 键和 < YES > 键进行系统厂家 PLC 程序输入，完成后按 < END > 键后再按 < SELECT > 键

就可退出。

④ 选择“7. SRAM DATA UTILITY”选项，再选择“SRAM RESTORE（MEMORY CARD→CNC）”选项，对 SRAM_BAK. 001 文件进行参数和应用程序的输入（如需覆盖已有参数和程序，再按一次 < YES > 键）。

⑤ 按 < END > 键，再按 < SELECT > 键退出。

3）用存储卡进行系统参数的备份和恢复。

切断 NC 电源和调出 BOOT 系统菜单画面，方法同“用存储卡进行 PLC 程序的备份和恢复”的步骤①和②。然后，按 < DOWN > 、< SELECT > 键选择“6. SYSTEM DATA SAVE”选项，按提示继续操作，进行参数和程序的备份和恢复。

示例 2：参数的备份与恢复（SIEMENS 840D 系统）。

1）合上机床总开关，把操作面板上的急停按钮锁紧（注意，在伺服参数、主轴参数没有调整完毕的情况下，不要拉起急停按钮，以免发生意外）。

2）将 U 盘插入到系统显示器下方的 U 盘接口处。

3）按显示器右下侧的 < Menu Select > 键，再按 < 服务 > 键，如图 3-7-11 所示。

图 3-7-11　参数的备份与恢复步骤一

4）进入“服务”画面，如图 3-7-12 所示。

5）按右扩展键，按 < 连续启动 > 键进入“创建连续启动文档”画面，如图 3-7-13所示。

6）将图 3-7-13 中的“HMI”、“PLC”前的“×”去掉，方法：将光标移至“HMI”，按右侧面板的 键进行选择。

选中“N C”、“带补偿数据”，两个都要用“×”标记。

7）在“文档名称”中写入自定义名称（一般为 NC + 日期），按 < Input > 键确认，选择右侧垂直栏的文件，参数备份或者恢复开始。

5. 如何更换电池？

更换数控系统的电池时一定要查阅相应的使用说明书，因为每个系统厂家的电池

图 3-7-12 “服务”画面

图 3-7-13 “创建连续启动文档”画面

安装位置不一样，每种型号更换方法也不一样，但是无论如何不可贸然在关机状态下就将电池拆除，这样会造成参数丢失的严重故障。

6. 冷却泵运转时噪声很大的原因是什么?

（1）原因分析

1）冷却泵轴承出现问题。

2）冷却泵叶轮已经损坏。

3）切削液液面低，切削液无法供给，转速加快，电流增大。

（2）解决办法　如果检查切削液的液位处于正常范围内，拆开冷却泵检查叶轮是否损坏，由于冷却泵价格较便宜，最快的解决方法就是更换一台新的冷却泵。

7. 冷却泵抽不上切削液，经常跳闸怎么办？

（1）原因分析

1）有铝屑（铝屑较轻）进入叶轮造成堵塞，冷却泵无法运转。

2）冷却泵密封圈损坏。

3）管路内混入空气。

4）冷却泵输出端单向阀损坏。

（2）解决办法

1）拆下叶轮进行清洗。

2）更换密封圈。

3）通过灌水的方法使管路排气。

4）更换单向阀。

8. 主轴高转速运转时有噪声，温度比较高怎么办？

（1）原因分析

1）主轴轴承研伤或损坏。

2）主轴润滑不好、缺润滑油；润滑油较脏，有杂质。

3）隔环端面有脏物。

4）主轴轴承的预紧力过大。

5）传动带位置和张力不合适。

6）主轴部件动平衡不好。

（2）解决办法

1）更换主轴轴承。

2）适当加注主轴油或更换新油，保证主轴的清洁。

3）拆下主轴后，清洗隔环。

4）重新调整预紧力。

5）重新调整传动带的位置和张力。

6）重新调整动平衡。

9. 在切削加工过程中，主轴振动大怎么办？

（1）原因分析

1）主轴轴承拉毛或损坏。

2）轴承预紧螺母松动造成主轴窜动。

3）轴承预紧力不够、间隙过大。

（2）解决办法

1）更换轴承。

2）紧固螺母，确保主轴精度合格。

3）重新调整轴承间隙，但预紧力不可过大。

10. 在加工过程中，显示器突然黑屏怎么办？

（1）原因分析

1）供给数控系统的220V交流电输入异常。

2）24V开关电源有问题。

3）显示器后的熔断器烧掉。

4）与显示器连接的信号传输线松动。

5）显示器质量不良。

6）系统主板有故障。

（2）解决办法

1）根据原理图检查有关的线路电压，使其正常。

2）用万用表检测，如开关电源损坏应更换。

3）确认熔断器烧掉的原因后更换损坏的电气元件。

4）紧固松动的线路。

5）调试或重新更换显示器。

6）检查主板，必要时需更换。

11. 手轮在旋转过程中有时不起作用怎么办?

（1）原因分析

1）手轮盒里线路接触不良。

2）手轮或接口不良。

3）伺服系统故障。

4）系统参数设置错误。

（2）解决办法

1）打开手轮盒将相关的线路紧固或更换。

2）检查主板，若正常则为手轮或接口不良，应更换。

3）首先检查机床的互锁信号、伺服断开信号和方式信号是否正确，再作进一步的检测。

4）重新设置系统参数。

第八章
液压与气动类问题

1. 加工中心常用的液压元件分几大类？主要元件有哪些？

常用液压元件可分为以下几类：

动力元件：齿轮泵、叶片泵、柱塞泵、螺杆泵。

执行元件：活塞液压缸、柱塞液压缸、摆动液压马达、组合液压缸、齿轮式液压马达、叶片液压马达、柱塞液压马达。

方向控制元件：单向阀、换向阀。

压力控制元件：溢流阀、减压阀、顺序阀、压力继电器等。

流量控制元件：节流阀、调速阀、分流阀。

辅助元件：蓄能器、过滤器、冷却器、加热器、油管、管接头、油箱、压力计、流量计、密封装置等。

2. 液压马达是如何工作的？

以轴向柱塞液压马达为例来说明液压马达的工作原理，如图 3-8-1 所示。

当液压油输入时，处于高压腔中的柱塞被顶出，压在斜盘上。设斜盘作用在柱塞上的反力为 F，力 F 的轴向分力 F_x 与柱塞上的液压力平衡，而径向分力 F_y 则使处于高压腔中的每个柱塞都对转子中心产生一个转矩，使缸体和马达轴旋转。如果改变液压马达液压油的输入方向，马达轴则反转。

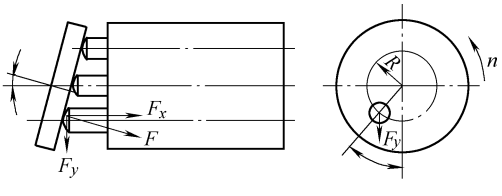


图 3-8-1　液压马达的工作原理

液压马达主要参数有：液压马达实际输出转矩 T 与转速 n，其关系为

$$T=\frac{1}{2\pi}\Delta pV\eta_{\mathrm{m}} \qquad n=\frac{q\eta_{\mathrm{v}}}{V}$$

式中　Δp——马达进出口压差；

q——马达输入流量；

V——马达排量；

η_{v}——马达容积效率；

η_{m}——马达机械效率。

3. 气动元件分为哪几类?

(1) 执行元件　气动系统常用的执行元件为气缸和气马达。气缸用于实现直线往复运动，输出力和直线位移。气马达用于实现连续回转运动，输出力矩和角位移。

(2) 控制元件　控制元件按其作用和功能分为压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀三类。

(3) 逻辑元件　气动逻辑元件是一种以压缩空气为工作介质，通过元件内部可动部件的动作，改变气流流动的方向，从而实现一定逻辑功能的流体控制元件。气动逻辑元件种类很多，按工作压力分为高压、低压和微压三种。按结构形式分类，主要包括截止式、膜片式、滑阀式和球阀式等几种类型。

(4) 气源装置及辅件　气源装置是用来产生具有足够压力和流量的压缩空气并将其净化、处理及储存的一套装置。其主要由空气压缩机、后冷却器、除油器、气罐、干燥器和空气过滤器等元件组成。

4. 气动元件的优点有哪些?

1) 气动装置结构简单、轻便、安装维护简单。介质为空气，较之液压介质来说不易燃烧，故使用安全。

2) 工作介质是取之不尽的空气，空气本身无需费用。排气处理简单，不污染环境，成本低。

3) 输出力以及工作速度的调节非常容易。气缸的动作速度一般小于 1m/s，比液压和电气方式的动作速度快。

4) 可靠性高，使用寿命长。电气元件的有效动作次数约为百万次，而一般电磁阀的寿命大于 3000 万次，某些质量好的阀超过 2 亿次。

5) 利用空气的压缩性，可储存能量，实现集中供气。可短时间释放能量，以获得间歇运动中的高速响应。可实现缓冲，对冲击负载和过负载有较强的适应能力。在一定条件下，可使气动装置有自保持能力。

6) 全气动控制具有防火、防爆、防潮的能力。与液压方式相比，气动方式可在高温场合使用。

7) 由于空气流动损失小，压缩空气可集中供应，远距离输送。

5. 气动元件的缺点有哪些?

1) 由于空气有压缩性，气缸的动作速度易受负载的变化而变化。采用气液联动方式可以克服这一不足。

2) 气缸在低速运动时候，由于摩擦力占推力的比例较大，气缸的低速稳定性不如液压缸。

3) 虽然在许多应用场合，气缸的输出力能满足工作要求，但其输出力比液压缸小。气动技术是以压缩空气为介质来传动和控制机械的一门专业技术。由于它具有节能、无污染、高效、低成本、安全可靠、结构简单等优点，广泛应用于各种机械和生产线上。过去汽车、拖拉机等生产线上的气动系统及其元件，都由各厂自行设计、制造和维修。

第九章

润滑剂与切削液类问题

1. 润滑剂的作用有哪些？

（1）润滑作用　润滑剂在摩擦表面形成一层油膜，使两个接触面上的凸起处不致产生撞击，并减小相互间的摩擦阻力。

（2）冷却作用　润滑剂的连续流动，可将机械摩擦所产生的热量带走，使零件工作时温度保持在允许的范围内。

（3）洗涤作用　通过润滑剂的流动，还可将磨下来的碎屑或其他杂质带走。

（4）防锈作用　润滑剂可防止周围环境中的水汽、二氧化硫等有害介质的侵蚀。

（5）密封作用　润滑剂对防止漏气、漏水具有一定的作用。

（6）缓冲和减振作用　润滑剂在摩擦表面之间具有缓冲和吸收振动的作用。

2. 机械油牌号中的数字代表什么意思？

机械油（俗称机油，现标准称为 L-AN 全损耗系统用油），其牌号 N 后边的数字表示油的黏度等级。黏度等级小的油适用于高速轻载的机械；黏度等级大的油适用于低速重载的机械。

例如，N2、N5、N7 和 N15 四种属于精密主轴油，既适用于精密机床主轴的滑动轴承，也适用于中等转速的精密滚动轴承。N68 属于重型机械用油，适用于大型轧钢机和剪断机等。

3. 润滑脂有几种类型？各用在什么场合？

（1）钙基润滑脂　它是用途最广的一种，呈黄色，防水性好，但熔点低、耐热性差。适用于工作温度不高和潮湿的场合。

（2）钠基润滑脂　呈暗褐色或黑色，耐热性较好，但不耐水。适用于高温重载的场合。

（3）锂基润滑脂　它是一种高效能润滑脂，呈白色，表面光滑，具有良好的抗水性能，能在 -60 ~ 150℃内使用。化学稳定性好，能保持长期不变质。适用于高速和精密机床的滚动轴承。

（4）铝基润滑脂　呈奶油状，外表光滑，缺乏塑性，具有高度耐水性、耐热性、润滑性和黏附性。常用于精密仪器和高速齿轮等润滑。

（5）石墨润滑脂　它是一种含有片状石墨的润滑脂，抗压能力强，耐高温。用于外露重载的轴承，不宜用于滚动轴承。

4. 切削液的作用有哪些?

(1) 冷却作用　切削液浇注在切削区域后，通过切削液的热传导、对流和汽化作用，使切屑、刀具和工件上的热量带走进而起到冷却作用。

(2) 润滑作用　切削液的润滑作用是通过切削液渗透到刀具与切屑、工件表面之间形成润滑膜而达到的。

(3) 洗涤与排屑作用　浇注切削液能冲走在切削过程中留下的细屑或磨粒，从而能起到洗涤、防止刮伤加工表面和机床导轨面的作用。

(4) 防锈作用　在切削液中添加防锈剂，能使金属表面生成保护膜，防止机床和工件受空气、水分和酸等介质腐蚀，从而起到防锈、防蚀的作用。

5. 常用的水基切削液有哪几种?

(1) 水溶液　在水中加入防锈剂、清洗剂，有时加入油性添加剂以增加润滑性。主要用于普通磨削和粗加工中。

(2) 乳化液　乳化液是在水中加乳化油搅拌而成的乳白色液体。按乳化油的含量可配制成不同浓度的乳化液，低浓度乳化液主要起冷却作用，适用于磨削和粗加工；高浓度乳化液主要起润滑作用，适用于精加工和复杂工序加工。乳化液极压润滑性好、防锈性优良、刺激性小、不含亚硝酸盐，适用于铝合金、不锈钢、黑色金属等材质。

(3) 化学合成液　化学合成液是一种较新型的高性能切削液，其中高速磨削切削液具有良好的冷却、润滑、清洗和防锈性能，对提高生产率、砂轮耐用度和磨削表面质量有显著的效果。合成切削液具有清洗性能好、缓蚀性优良、低泡、不含亚硝酸盐等特点，适用于黑色金属等材质。

6. 常用的油基切削液有哪些类型?

(1) 切削油　有矿物油、动物油、植物油、动植物混合物。但动物油、植物油易变质，故较少采用。普通车削、攻螺纹可选用机油。在精加工有色金属和铸铁时，常选用煤油或煤油与矿物油的混合油。普通孔或深孔精加工时可使用煤油或煤油与机油的混合油。

(2) 极压切削油　在切削油中加入硫、氯化磷极压添加剂后，能显著地提高润滑效果和冷却作用，特别是在精加工、关键工序和难加工材料切削时尤为显著。

第四篇 加工中心加工实例

案例 1

箱体类零件加工实例

一、加工中心的工作流程

加工中心加工零件时，完全按程序指令进行工作，因此加工程序是决定加工质量的关键。但编制程序是综合各工艺要素和机床操作功能的过程，要考虑工件的装夹方式、刀具切削用量及机床的各种功能，程序编制的内容和格式因数控系统不同而有所不同，但程序编制和机床的使用过程是基本相同的。加工中心的工作流程如图 4-1-1 所示。

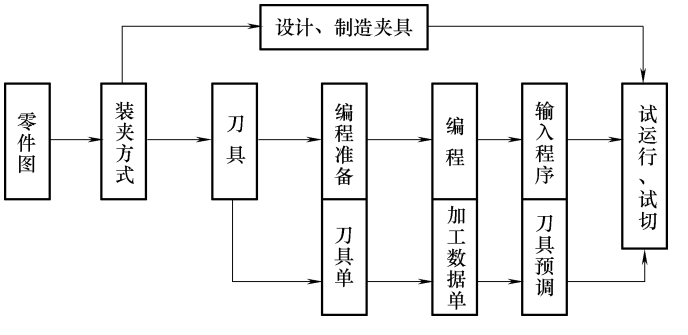


图 4-1-1　加工中心的工作流程

二、零件分析

用数控机床加工零件，要先分析被加工零件的外形和尺寸，根据尺寸要求进行工艺分析，确定装夹方式和使用的刀具，然后编辑加工程序。如图 4-1-2 所示为磨床主轴箱体零件，本案例讲解利用专用夹具在加工中心上进行该零件的加工。

在机械加工过程中，有很多因素影响工件的加工质量，如何使工件的加工达到质量要求，如何减少各种因素对加工精度的影响，成为加工前需要考虑的问题，就是要

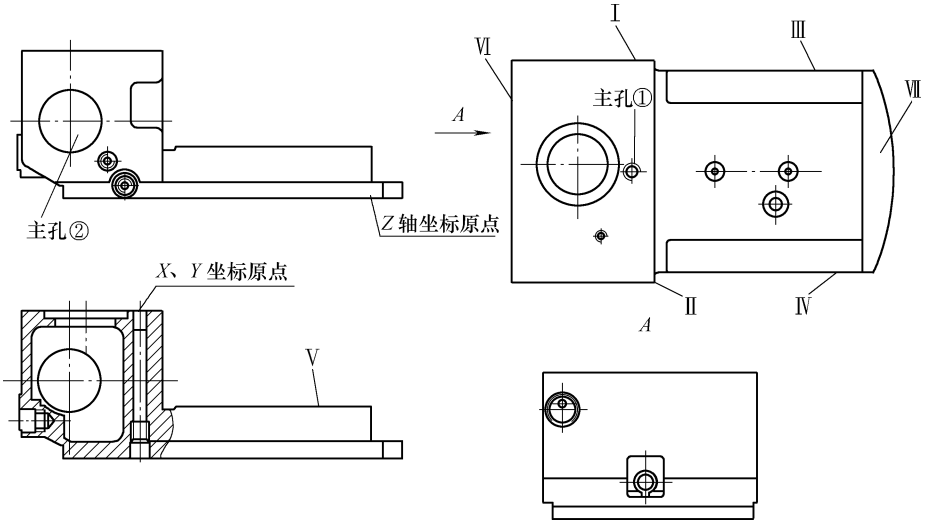


图 4-1-2　磨床主轴箱体示意图

对影响机械加工精度的因素进行分析。

机械加工精度是指机械零件经过机械加工后所得实际几何参数与理想参数相符合的程度。加工精度由以下三方面组成：

1）尺寸精度。

2）几何形状精度。

3）相互位置精度。

在加工过程中是否能使零件的这三方面的误差达到最小，是加工高精度零件的关键。

加工中心可以采用铣、钻、扩、铰、镗、攻螺纹等加工方法，完成平面、曲面、孔、螺纹等的加工，所选用的加工方法与零件的表面特征、所要达到的精度及表面粗糙度相适应。理想的加工工艺安排不仅要保证加工出图样要求的合格工件，同时应能使加工中心机床的功能得到合理应用与充分发挥。

三、加工工艺分析

表 4-1-1 是在普通机床上加工图 4-1-2 所示箱体零件的加工工艺的一部分，其中工序 1、6 在卧式铣床上加工，工序 2 在立式铣床上加工，工序 3 在卧式镗床上加工，工序 4、5 在单臂钻床上加工。在各机床上加工前，先要有划线工序。每道工序选用的机床不同，机床的精度影响了工件的精度，多次的装夹也使工件的加工误差变大；需多台机床协作完成，零件加工周期长。改用加工中心加工此零件后避免了上述不足。表 4-1-2是在加工中心上加工该箱体零件的加工工艺。

表 4-1-1　箱体零件加工工艺（普通机床版）

	工艺卡片	产品型号	产品名称	零件号	零件名称	共　页	
		M01		3A81-103	主轴箱体	第　页	
工序号				设备或工种	工具名称和编号		
					夹具	刃具	辅助工具	量具
1	以底面定位，铣Ⅰ、Ⅱ两面和Ⅵ面的脐子面			普通卧式铣床				
2	铣Ⅴ面、Ⅷ面、三个脐子面，修整Ⅶ面顶端圆弧			立式铣床				
3	粗、精镗成主孔②，划平孔两端面（保证孔同轴度0.002mm，孔与两端面垂直度0.002mm，孔与底面的平行度0.002mm）			卧式铣床				
4	钻Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅵ面各孔			单臂钻床			钻模	
5	按线加工孔①			单臂钻床				
6	以孔①及底面定位，铣Ⅲ、Ⅳ两面（要求两面对孔①对称度0.1mm）			普通卧式铣床				

表 4-1-2　箱体零件加工工艺（加工中心版）

	工艺卡片	产品型号	产品名称	零件号	零件名称	共　页	
		M01		3A81-103	主轴箱体	第　页	
工序号	工序内容及工序简图			设备或工种	工具名称和编号		
					夹具	刃具	辅助工具	量具
1	钻：按线加工孔①			单臂钻床				
2	镗铣：工位Ⅰ 使用夹具安装工件，找正与机床主轴轴线的平行度0.01mm，以底面及孔①定位，按主孔找正线找正加工 1）粗、精铣成Ⅰ、Ⅱ两面 2）粗、精铣成Ⅲ面、Ⅳ面、Ⅴ面、Ⅶ面，刀具修整Ⅶ面顶端圆弧 3）粗、精镗成主孔②，倒角 *C*1 4）划平孔两端面（保证孔同轴度0.002mm，孔与两端面垂直度0.002mm，孔与底面的平行度0.002mm） 5）钻Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ面各孔 工位Ⅱ			卧式加工中心	专用夹具			

（续）

	工艺卡片	产品型号	产品名称	零件号	零件名称	共　页	
		M01		3A81-103	主轴箱体	第　页	

工序号	工序内容及工序简图	设备或工种	工具名称和编号			
			夹具	刃具	辅助工具	量具
	以定位轴为中心，将工翻转 90°，按线找正后夹紧，加工步骤如下： 1）铣成 *A* 向Ⅵ面 20×315 小边 2）铣成宽 12mm 豁口及铣平凸台 3）钻 M24×1.5 底孔至 ϕ22.5mm 4）钻 M27×1.5 底孔至 ϕ25.5mm 5）铣成 ϕ38mm、深 3mm 的不通孔，铣成 ϕ36mm、深 25mm 的不通孔 要求： 1）Ⅰ、Ⅱ两侧面与孔①对称度 0.3mm 2）2×主孔②两孔圆度公差≤0.008mm；两孔等径公差 0.01mm 3）2×主孔②同心度公差 0.01mm 4）2×主孔②对底面平行度≤0.006mm，用检具在平台上检测 5）Ⅰ、Ⅱ两侧面对孔②垂直度-垂直检具、塞尺检验					内径千分表专用同心检棒 垂直检具、塞尺

四、箱体零件在夹具上的装夹方式和加工过程

工件的装夹应简单，尽量在一次装夹后完成多项加工内容，并保证尺寸精度。箱体零件在夹具上的装夹方式如图 4-1-4 所示。

1. 加工思路

1）将零件上的孔①作为基准孔，先用普通钻床将此孔加工完毕。

2）在装夹时将孔①对准夹具上的定位钢轴，用长螺栓固定，如图 4-1-3 所示，按线找正工件后紧固螺栓，如图 4-1-4b 所示。

3）用两个可调垫铁支撑工件底面，在工件的上下各选一点作为辅助紧固点，紧固工件。

2. 箱体零件的加工过程

第一步：先加工工件的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ面，主孔②及各面的其他各孔，保证Ⅲ、Ⅳ面对孔①的对称度。

第二步：将螺钉 *B* 去除，铣Ⅶ面及上圆弧面。

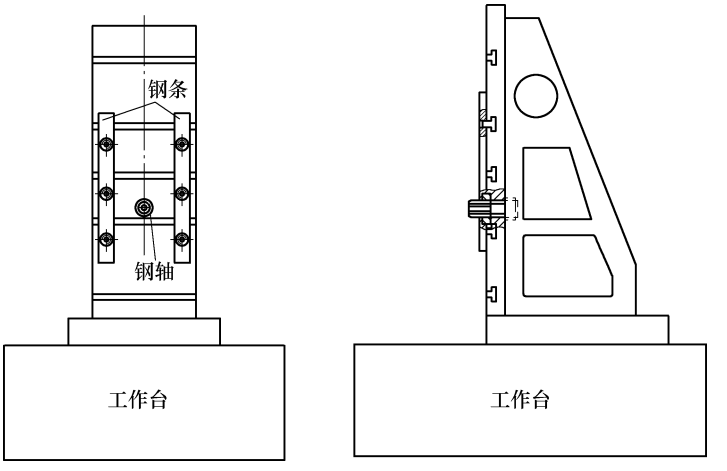


图 4-1-3　为磨床主轴箱体设计制作的夹具

第三步：松开螺钉 *A*、*C*，机床主轴上安装定位棒，与Ⅲ面接触定位，工件旋转 90°，重新紧固工件，用千斤顶支撑Ⅲ面，如图 4-1-4a 所示，完成Ⅵ面的各项加工内容。

说明：主孔②的精度要求高，所以在粗镗完成后就加工其他端面的各孔，使此孔有充足的冷却时间；在精加工此孔时，先将夹紧点 *C* 松开，释放夹紧变形，再以很小的力紧固，加工主孔②的两侧端面和进行主孔的精加工。以此保证孔同轴度，孔与两端面的垂直度，孔与底面的平行度。

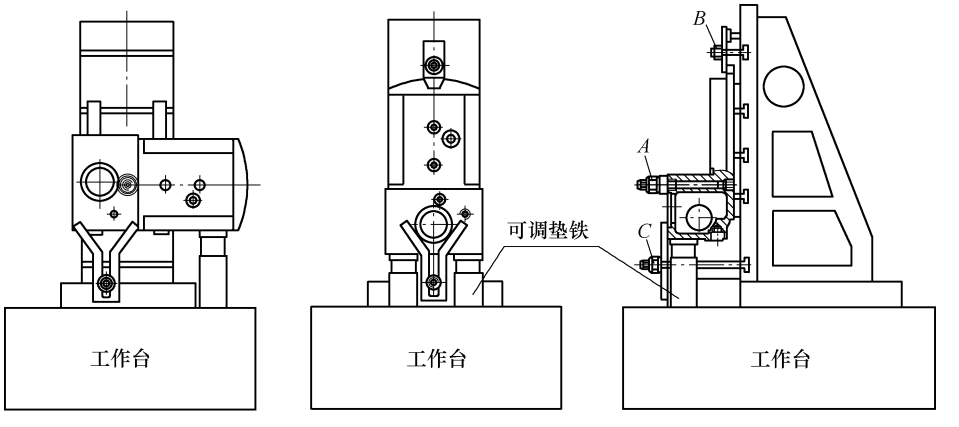


图 4-1-4　主轴箱体加工时不同的装夹方式

下面是加工这个箱体零件的部分加工程序：

```
G40  G49  G80;
G0  G91  G28  Y0  Z0;
T2  M6;                                    (采用 T2、φ125mm 的面铣刀)
```

```
T3;                                    (φ70mm 铣刀准备)
N1;                                    (第一段程序开始:铣Ⅰ、Ⅲ面)
G90  G55  G0  X-180  Y86  S260;
G43  Z5  H2  M3;
G1  F120  Z.5;
X100;
Y-25;
X-80;
G0  Z20;
Y560  X85;
Z-4.6;
G1  Y210;
X50;
G0  Z550;
G91  M10;
B-180;                                 (工作台转 180°)
M11;
G90  G56  X180  Y85  S260              (铣Ⅱ、Ⅳ面)
G43  H2  Z5  M03;
G1  Z0.5  F120;
X-100;
Y-25;
X80;
G0  Z20;
X-85  Y560;
Z-14.7;
G1  Y210;
X0;
G0  G49  Z550;
G91  G28  Y0  Z0;
M6;
T1;                                    (φ99mm 粗镗刀具准备)
M10;
G0  G91  B90;
M11;
N2;                                    (第二段程序开始)
G90  G54  G0  X-135  Y405  S150;
G43  Z-140  H3  M3;                    (φ70mm 铣刀铣Ⅴ面)
G1  Z-149  F800;
```

```
F80;
Y74;
X54   F200;
X133   F80;
Y336;
Y406   F200;
S300;
Z-149.8   F80;
Y74;
X150;
X-54   F200;
X-150   F80;
X-130;
Y370;
G0   X48   S160;
Y295;
G1   Y230;
X0;
Y130;
G0   Z200;
G91   G28   Y0   Z0;
G49;
M6;
T17;                                    (φ40mm 铣刀准备)
G0   M10;
B-90;                                   (工作台旋转 90°)
M11;
N3;                                     (第三段程序开始)
G90   G55   G0   X0   Y0   S240;
G43   Z50   H1   M3;                    (φ99mm 粗镗刀粗镗主孔②)
G86   Z-55   R6   F50;
G0   Z500;
G91   M10;
B-180;                                  (工作台转 180°)
M11;
G0   G90   G56   X0   Y0   S240   M3;
G43   H1   Z50;                         (φ99mm 粗镗刀粗镗工件另一端主孔②)
G86   Z-55   R6   F50;
G80   G49   G0   Z500;
```

```
G91  G28  Y0  Z0;
M6;
T18;                                  (φ100mm 精镗刀准备)
N4;                                   (第四段程序开始)
G90  G56  G0  X180  Y87  S300;
G43  Z10  H17  M3;                    (φ40mm 铣刀铣削主孔端面)
G1  Z0  F800;
X-100  F100;
Y-25;
X180;
G0  Z500;
M10;
B180;                                 (工作台旋转 180°)
M11;
G55  X-180  Y87;
Z50;
G1  Z0  F800;
X100  F100;
Y-25;
X-180;
G0  G49  Z450;
G91  G28  X0;
G28  Y0  Z0;
M6;
T4;                                   (φ50mm 铣刀准备)
N5;                                   (第五段程序开始 )
G90  G55  G0  X0  Y0  S40;
G43  Z50  H18  M3;                    (φ100mm 精镗刀精镗主孔②)
Z5;
G1  Z-60  F25;
G0  Z-275;
G1  Z-338;
M5;
G0  Z80;
G91  G28  Y0  Z0;
G49  G28  X0;
M10;
G0  B-90;
M11;
```

```
M6;
T2;                                    (φ125mm 端面铣刀准备)
M0;
N6;                                    (第六段程序开始)
G90  G54  G0  X-185  Y385  S250;
G43  H4  Z-204.8  M3;                  (φ50mm 铣刀铣Ⅶ面)
G1  X185  F80;
G0  Z300;
X-185  Y400;
Z-253;
G41  G1  X-157.5  Y378.54  D50;
G02  X157.5  Y378.542  R410;
G40  G1  X185  Y400;
G0  Z200;
G91  G28  Y0  Z0;
G49  M6;
M00;                                   (机床暂停,操作者将工件旋转 90°,如
                                       图 4-1-4a所示)
N7;                                    (第七段程序开始)
G90  G0  G59  X-300  Y105  S260;
G43  H2  Z-0.2  M3;                    (φ125mm 端面铣刀铣Ⅵ)
G1  X-30  F200;
Y77.5;
X-230;
Y-12.5;
X-161;
Y20;
Y-102.5;
X-50;
Y-127.5;
X-230;
Z2.8;
G0  Y0;
G1  X-65;
G0  Z450;
G91  G28  Y0  Z0;
M6;
M30;                                   (程序结束)
```

案例 2

圆柱面插补加工宏程序编程实例

如果能够很好地运用宏程序编程，会提高数控机床的加工能力，发挥机床的潜能。以下通过举例来说明宏程序编程的应用。如图 4-2-1 所示，这是一个药丸封装模具毛坯，需要在毛坯的圆柱面上加工出一系列药丸的封装凹模（为了简化起见，图 4-2-2 只绘出了药丸包装边缘凹槽）。

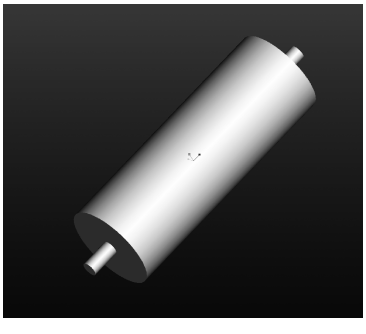


图 4-2-1　药丸封装模具毛坯

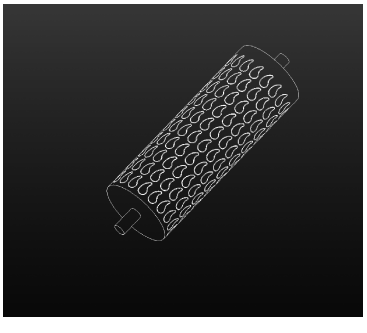


图 4-2-2　加工示意图

圆柱面直径为 120mm，凹槽的展开尺寸如图 4-2-3 所示，凹槽深度为 0.5mm，凹槽宽度为 1mm，毛坯材料为 2A12。

首先简单分析一下这个零件的加工工艺。该零件的加工是一个典型的圆柱表面雕刻加工案例，需要四轴加工中心来完成，本案例选择一台典型的立式加工中心附加第四轴转台的机床来加工，转台绕 *X* 轴旋转，第四轴为 *A* 轴，机床使用的是 FANUC 0i-MD 数控系统。该零件两端有轴，适合于用卡盘和尾座顶尖卡紧加工，转台端面安装三爪卡盘，安装卡盘时，要求卡盘中心与转台中心重合，尾座顶尖的高度要与卡盘中心等高。加工凹槽刀具选择直径为 1mm 的三刃硬质合金键槽铣刀，刀具直径与凹槽要求宽度一致，一次铣成（如果图样要求凹槽两侧质量较高，需要使用小直径刀具，分多次加工，凹槽两侧用不同程序铣削，以保证其轮廓精度和表面粗糙度）。

接下来分析编程思路。通过分析图样可以看到凹槽内侧轮廓由四段相切的不同半径的圆弧组成。由于这是一个展开图，并且要求凹槽侧素线垂直于圆柱面，不能用 *XY* 轴插补运动加工，需要用 *X* 和 *A* 轴插补加工，也就是用直线轴和旋转轴插补加工展开面的圆弧图案，所以需要将展开图的 *Y* 坐标转换成 *A* 轴坐标，该转换过程是编程的关

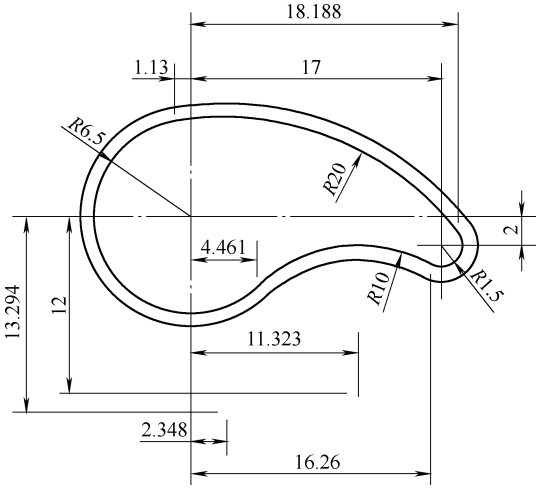


图 4-2-3　药丸轮廓展开图

键。为了做好这个转换，一定要对加工轨迹的特点进行仔细分析，找到它们转换的对应关系。

圆的标准方程如下：

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2$$

其中，圆心坐标为（a，b），r 为半径。方程演变为：

$$y=\pm\sqrt{r^2-(x-a)^2}+b$$

展开图的 Y 坐标与圆柱面对应的圆弧角度关系为：

$$\frac{y}{A}=\frac{\pi D}{360}$$

其中，D 为圆柱面的直径，A 坐标即为圆弧角度。由上式推导出 A 与 y 的关系：

$$A=\frac{360}{\pi D}y$$

$$A=\pm\frac{360}{\pi D}\left[\sqrt{r^2-(x-a)^2}+b\right]$$

找到这个转换关系之后，只要编程实现它即可。不同的加工轨迹有不同的转换关系，在编程之前就要对转换关系进行思考，如果装夹方式不一样，可能导致关系函数的变化，关系函数的变化直接影响编程的难易和最终加工的成败。

针对这个零件，可以把图样上的轨迹分成 6 段来加工，每段使用不同的函数，运用以前学习的对 FANUC 系统变量的知识可以着手编程。加工程序如下：

```
O0001;
T01  M06  (D=1,ENDMILL);
G90  G54  G00  X-7.0  Y0  A0;
G43  Z100  H01;
```

```
S3500  M13;
G0  Z20;
G01  Z2  F500;
G01  Z-0.5  F200;
G41  G01  X-6.5  Y0  D01;(加上刀具半径补偿)

#500=360/[3.14159*120];
#100=0.01;(步长)

#101=-6.5;(X起始值)
#102=0;(A起始值)
#103=0;(圆心坐标)
#104=0;(圆心坐标)
#105=6.5;(圆弧半径)
WHILE [#101 LE-1.13] DO1;
#101=#101+#100;
#102=#500*[SQR[#105*#105-[#101-#103]*[#101-#103]]+#104];
G01  X#101  A#102;
END1;

#103=2.348;
#104=-13.294;
#105=20;
WHILE [#101 LE 18.188] DO2;
#101=#101+#100;
#102=#500*[SQR[#105*#105-[#101-#103]*[#101-#103]]+#104];
G01  X#101  A#102;
END2;

#103=17;
#104=-2;
#105=1.5;
WHILE [#101 LE 19] DO3;
#101=#101+#100;
#102=#500*[SQR[#105*#105-[#101-#103]*[#101-#103]]+#104];
G01  X#101  A#102;
END3;
```

```
#103 = 17;
#104 = -2;
#105 = 1.5;
WHILE [#101 GT 16.26] DO4;
#101 = #101 - #100;
#102 = -#500 * [SQR[#105 * #105 - [#101 - #103] * [#101 - #103]] + #104];
G01 X#101 A#102 F200;
END4;

#103 = 11.323;
#104 = -12;
#105 = 10;
WHILE [#101 GT 4.461] DO5;
#101 = #101 - #100;
#102 = #500 * [SQR[#105 * #105 - [#101 - #103] * [#101 - #103]] + #104];
G01 X#101 A#102;
END5;

#103 = 0;
#104 = 0;
#105 = 6.5;
WHILE [#101 GT -6.5] DO6;
#101 = #101 - #100;
#102 = -#500 * [SQR[#105 * #105 - [#101 - #103] * [#101 - #103]] + #104];
G01 X#101 A#102;
END6;

G01 G40 X-7.0 Y0;(取消刀具半径补偿)
G01 Z20;
G00 Z100;
M05;
M09;
M30;
```

为了简明起见，这个示例程序没有做更复杂的重复循环套用，非必要的指令也没有加入。对于这个零件，推导函数关系的时候，也可以使用三角函数，通过引入一个自变量，将二次函数降阶为一次函数，程序的结构会进一步简化，也不失为一种值得

尝试的好思路。应注意积累宏程序编程的经验，如：推导相关轴的函数关系要求简单明确，尽量简化；宏程序的结构简洁、整齐，少用 GOTO 指令，程序的逻辑结构不要过于复杂，满足使用即可，若使用繁杂的逻辑结构，将导致阅读程序和调试程序难度提高，操作人员在加工的时候也是提心吊胆。另外，使用的变量要求做统一规划，不要随意分配，要保证每个变量的安全；如果是子程序，调用子程序时要编制一些现场保护和现场恢复的指令，确保安全可靠，增强程序的牢固性和抗干扰能力，否则子程序在不同条件下调用可能会出现灾难性后果。

如果对宏程序比较熟练，还可对程序进行进一步的封装，做成标准指令的形式，扩展系统的指令，可以供他人在以后的编程中使用。

案例 3

螺纹铣削加工

传统的螺纹加工方法主要是螺纹车刀车削螺纹或使用丝锥、板牙手工攻螺纹，随着数控技术的发展，加工中心机床的普及，螺纹铣削加工已广泛应用，现在的数控系统都具有螺旋线插补功能。螺旋线插补是指在指定加工平面内，两轴联动的圆弧插补运动与另一轴的直线运动，三个轴的运动是同步的，并且同时到达目标位置，刀具的运动轨迹是符合要求的螺旋线。虽然螺旋插补功能在实际加工中不常用，但随着数控加工中心机床的普及，对于非标或直径较大的螺纹加工，螺旋铣削加工却是唯一方法。螺纹铣削加工，要满足以下条件才可进行：加工设备具有螺旋插补功能，在螺纹铣削中，圆周运动产生螺纹的直径，同步的直线运动产生螺距；螺纹底孔直径已经加工成；选择对应螺距的螺纹铣刀。

一、螺纹铣削优点

可铣削无法用丝锥加工的大直径螺纹；在加工不通孔螺纹时，能够将螺纹铣削到所需深度；一把螺纹铣刀不受螺纹直径和螺纹旋向的限制，只要螺距相同，既可加工左旋螺纹也可加工右旋螺纹，还可加工内螺纹和外螺纹；可以减小或消除螺纹上的毛刺，得到较高的表面质量；螺纹直径尺寸的调整极为方便。

二、螺纹铣刀种类及加工前准备

常用螺纹铣刀有硬质合金螺纹铣刀和螺纹梳刀，如图 4-3-1 所示。

因为螺纹铣刀螺距是固定的，程序中主轴旋转方向、圆弧加工方向和 Z 轴运动方向，决定了加工后螺纹的旋向是左旋螺纹还是右旋螺纹，内螺纹还是外螺纹。生产上常用的方法是用螺纹铣刀加工内螺纹，螺纹铣削开始时，铣刀必须位于螺纹孔的中心及 Z 轴方向的安全深度，为了保证螺纹平滑过渡，加工初始和结束时应采用圆弧导入导出。由于螺纹铣刀是相互平行的齿，铣出的是一系列的槽，而不是螺纹，为了避免这种情况，铣刀加工螺纹的导入和导出轨迹也应采用螺旋加工，铣刀螺旋进给时直线轴移动的距离通过螺距及导入圆弧的行进角度计算得出。如螺纹螺距为 2mm，导入、导出运动时圆弧上

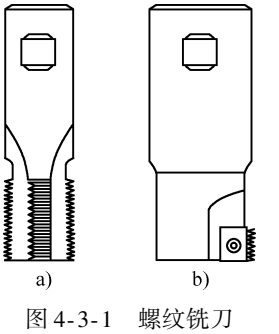


图 4-3-1　螺纹铣刀

a）硬质合金螺纹铣刀　b）螺纹梳刀

的行进角度均为90°，那么当铣刀转过90°圆弧时，直线轴移动的距离为螺距的1/4。螺旋插补的直线行程 L（单位：mm）为

$$L = P \times AP/360$$

式中 P——螺纹螺距（mm）；

AP——插补角度（°）。

和导入运动一样，刀具从螺纹中的退出也采用同样的运动轨迹。

根据刀具圆周进给方向，G02或G03以及主轴沿 Z 轴的运动方向，向上或向下，螺纹铣削有顺铣和逆铣两种加工方式。顺铣加工切削力较小，切屑形成较好，能提高表面质量及延长刀具寿命，因此应优先考虑使用。对于硬质表面和难铣削的材料，采用逆铣效果可能更好。

加工内螺纹时，螺纹底孔直径决定了铣刀的最大直径，为达到螺纹加工的最佳质量，应尽量使用大直径的螺纹铣刀，但刀具成本将增加；小直径铣刀适用于较大进给量的螺纹加工，能提供好的冷却条件和更大的排屑空间，但由于它的低稳定性，加工硬材料时会出现振动。当螺纹铣刀切削刃有效长度比所加工螺纹长时，螺纹可以在一次旋转加工中铣削而成。而当切削刃有效长度比螺纹长度短时，则应在多次旋转中完成螺纹铣削加工，连续铣削之间不能出现空隙。

三、铣削高质量螺纹的最佳方法

铣削时以相切圆弧的方式切入。刀具从孔中心位置快速移动距螺纹底孔大约0.5mm的位置，以圆弧轨迹运动并同时沿 Z 轴移动1/4螺距，切入工件至完整的牙形深度，经过一个螺距封闭环路，铣刀以同样的方式切出工件。即使加工很硬的材料，也不会发生振动，铣削加工外螺纹时，最简单实用的方法是相切直线方式切入。

1. 计算主轴转速

$$n = 1000 \times V_c/\pi \times d_1$$

式中 n——主轴转速（r/min）；

V_c——切削线速度（m/min）；

d_1——螺纹铣刀直径（mm）。

2. 计算切入/切出圆弧半径

$$R_e = (R_i - C_i)^2 + R_0^2/2 \times R_0$$

式中 R_e——切入/切出圆弧半径（mm）；

C_i——取0.5（mm）；

R_i——螺纹底孔半径（mm）；

R_0——螺纹名义半径（mm）。

刀具切入/切出螺纹时，主轴沿 Z 轴的移动量 Z 为螺距的1/4。

四、螺纹铣削加工实例

如图4-3-2所示，铣削加工M16×1.5内螺纹。工件材料为42CrMo，刀具为硬质合

金螺纹铣刀，螺纹长度为17.5mm，铣刀转速为1100r/min，铣削进给量为110mm/min。

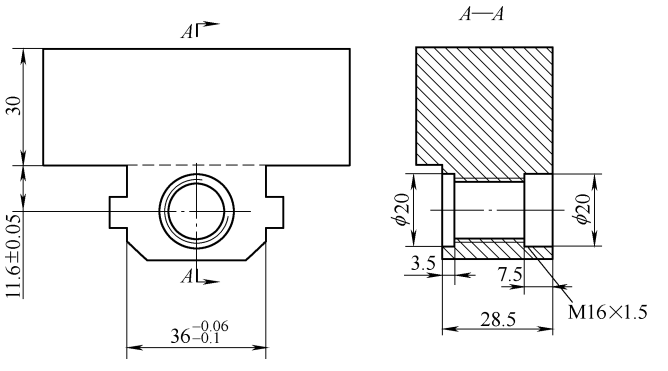


图4-3-2　螺纹铣削实例

1. 工艺分析

如图4-3-2所示为M16×1.5的右旋内螺纹，孔中心位置距离尺寸30为（11.6±0.05）mm，对槽宽尺寸$36^{-0.06}_{-0.1}$mm左右对称。为使螺纹铣削加工顺利进行，保证零件加工质量，零件粗加工后需进行调质热处理，改善加工性能。

2. 工艺方案

采用虎钳装夹。机床工作台面上安装虎钳时，要将它的固定钳口找正；在装夹零件时，零件要放在钳口中间部位，底部用平行的垫块垫起，零件被加工部分尽量高出钳口，避免刀具与钳口发生干涉。

3. 选择刀具、确定加工路线

（1）钻中心孔　由于钻头有较长的横刃，定位性不好，用定心钻在螺纹孔中心钻出中心孔。

（2）钻孔　用φ14mm钻头钻出螺纹初始底孔。

（3）扩孔　用φ14.5mm专用键槽铣刀（镗刀）扩成螺纹底孔，保证螺纹孔位置度满足图样要求。

（4）锪孔　用φ20mm铣刀加工φ20mm、深7.5mm沉孔。

（5）倒角　用φ18×90°mm倒角刀将孔口倒角。

（6）铣螺纹　用φ12mm硬质合金螺纹铣刀铣削右旋螺纹孔。

（7）切削用量及加工程序。

刀具号	刀具名称	刀具规格/mm	工序内容	转速/(r/min)	进给量/(mm/min)
T01	定心钻	φ12×90°	钻中心孔	800	80
T02	钻头	φ14	钻孔	400	80
T03	铣刀	φ14.5	扩孔	600	72
T04	铣刀	φ20	锪沉孔	400	60
T05	倒角刀	φ18	倒角	500	120
T06	螺纹铣刀	φ12	铣螺纹	1100	110

```
O1000;
T01  M6                                    (定心钻)
G17  G40  G80;
G00  G90  G54  X0  Y0;
G43  H1  Z50;
S800  M3  F80;
M8;
G98  G81  R5  Z-3;
G80  M5;
M9;

T02  M6;                                   (φ14mm 钻头)
G00  G90  G54  X0  Y0;
G43  H2  Z50;
S400  M3  F80;
M8;
G98  G83  R5  Q3  Z-34;
G80  M5;
M9;

T03  M6                                    (φ14.5mm 铣刀)
G00  G90  G54  X0  Y0;
G43  H3  Z50;
S600  M3  F72  M8;
G98  G73  R5  Q2  Z-30;
G80  M5;
M9;

T04  M6                                    (φ20mm 铣刀)
G00  G90  G54  X0  Y0;
G43  H4  Z50;
S400  M3  F60  M8;
G98  G82  R5  Z-7.5  P2;
G80  M5;
M9;

T05  M6;                                   (φ18mm 倒角刀)
```

```
G00　G90　G54　X0　Y0;
G43　H5　Z50;
S500　M3　F120;
M8;
G98　G82　R-5　Z-8.5　P2;
G80　M5;
M9;

T06　M6;                                    (螺纹铣刀)
N10　G00　G90　G54　X0　Y0;                 (铣刀定位螺纹孔中心)
G43　H6　Z50;                               (调刀长值)
S1100　M3　F110;
M8;
G00　Z-27.25;                               (刀具至孔底深度)
G91　G01　G41　D6　Y-6.75;                  (加刀补至安全点)
G03　X8　Y6.75　Z0.375　R6.848;             (逆时针切入工件)
G03　X0　Y0　Z1.5　I-8;                     (螺纹铣削,加工一个完整的螺距)
G03　X-8　Y6.75　Z0.375　R6.848;            (逆时针切出工件)
G90　G01　G40　X0　Y0;                      (退到孔心)
G00　Z50;                                   (Z 轴退回到安全高度)
M5;
M9;
M02;                                        (程序结束)
```

五、零件检验

螺纹加工后，不要拆下零件，需用螺纹塞规检验螺纹是否满足图样要求，如果塞规通端不入，可在刀具半径补偿参数中修改刀具补偿值后，再次加工，直至螺纹达到要求。

案例 4

工件在工作台上的摆放问题

一个工件能否在某台机床上加工，这是经常需要考虑的问题。小工件直接放到工作台上实测即可，但是对于大型工件就比较困难，因此最好的办法就是根据工件的长、宽以及机床工作台的面积进行计算。计算过程涉及 4 次方的运算，分析过程如下。

设工作台长宽分别为 a、b，工件的长宽分别为 c、d，如图 4-4-1 所示。

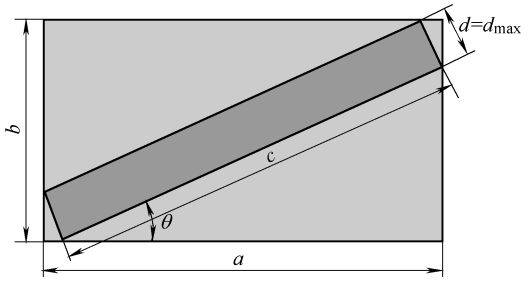


图 4-4-1　工件在工作台上的摆放

如果 $a < c < \sqrt{a^2+b^2}$，则工件只能斜着摆放在工作台内，才不至于超出工作台的四边，而且工件的宽 d 还会受到限制，假设其上限为 d_{max}，则不难想到 d_{max} 与工件长度 c 有关。

比较容易想到两种极端的情况为：如果 $c=a$，则 $d_{max}=b$；如果 $c=\sqrt{a^2+b^2}$，则 $d_{max}=0$；所以不难想到 $a<c<\sqrt{a^2+b^2}$ 时，d_{max} 显然介于 b 与 0 之间。

然而，d_{max} 是否可由已知的数据 a、b、c 计算出来呢？这就是本案例要回答的问题。

图 4-4-1 给出了 $d=d_{max}$ 时工件的摆放方式，设此时工件的长边与工作台的长边的夹角为 θ，则 θ 也可由 a、b、c 计算出来。

由图可以得到 a、b、c、d（$=d_{max}$）与 θ 所满足的关系式：

$$c\cos\theta + d\sin\theta = a \tag{4-4-1}$$

$$d\cos\theta + c\sin\theta = b \tag{4-4-2}$$

按照解方程组的原理，5 个数据，由 2 个关系式联系，一般可以从中解出 2 个数据。

问题是要解出 $d(=d_{max})$ 与 θ 来，这是有一定困难的。解方程组，还是要用到消元

法，消去 θ 或者 d。

暂把式（4-4-1）与式（4-4-2）看作以 $\cos\theta$ 与 $\sin\theta$ 为未知数的二元一次方程组，可解出

$$\cos\theta = \frac{ac - bd}{c^2 - d^2} \tag{4-4-3}$$

$$\sin\theta = \frac{bc - ad}{c^2 - d^2} \tag{4-4-4}$$

以上两式分别平方后再相加，可消去 θ，得到：

$$(ac - bd)^2 + (bc - ad)^2 = (c^2 - d^2)^2 \tag{4-4-5}$$

式（4-4-5）可看作 d 的一元方程，是一个 4 次方程，根据实际问题可以断定它一定有唯一大于 0 的解，但却难以解出；对于 a、b、c 具体给出的数值，利用计算机来求解（用数学计算软件或自行编程）是不难的。

暂把式（4-4-1）与式（4-4-2）看作以 c 与 d 为未知数的二元一次方程组，可解出

$$c = (a\cos\theta - b\sin\theta)/\cos 2\theta \tag{4-4-6}$$

$$d = (b\cos\theta - a\sin\theta)/\cos 2\theta \tag{4-4-7}$$

式（4-4-6）消去了 d，是未知数 θ 的三角方程，若要化作 θ 的同名三角函数（$\cos\theta$ 或 $\sin\theta$）的有理方程，也会成为 4 次方程。

在实际生产中，比较简单的办法是：对已给定的工作台的长宽数据 a、b 以及对于小于 $\arctan(b/a)$ 的倾角 θ 的一系列数值 1°、2°、…，按照式（4-4-6）与式（4-4-7）两式，计算出 c 与 d 的对应的数值，制作一个表以备查，不但免去了解方程之累，又方便使用。

附　录

附录 A

加工中心操作工国家职业标准

1. 职业概况

1.1　职业名称

加工中心操作工。

1.2　职业定义

从事编制数控加工程序并操作加工中心机床进行零件多工序组合切削加工的人员。

1.3　职业等级

本职业共设四个等级，分别为：中级（国家职业资格四级）、高级（国家职业资格三级）、技师（国家职业资格二级）、高级技师（国家职业资格一级）。

1.4　职业环境

室内、常温。

1.5　职业能力特征

具有较强的计算能力和空间感，形体知觉及色觉正常，手指、手臂灵活，动作协调。

1.6　基本文化程度

高中毕业（或同等学力）。

1.7　培训要求

1.7.1　培训期限

全日制职业学校教育，根据其培养目标和教学计划确定。晋级培训期限：中级不少于400标准学时；高级不少于300标准学时；技师不少于300标准学时；高级技师不少于300标准学时。

1.7.2　培训教师

培训中、高级人员的教师应取得本职业技师及以上职业资格证书或相关专业中级及以上专业技术职称任职资格；培训技师的教师应取得本职业高级技师职业资格证书或相关专业高级专业技术职称任职资格；培训高级技师的教师应取得本职业高级技师

职业资格证书2年以上或取得相关专业高级专业技术职称任职资格2年以上。

1.7.3　培训场地设备

满足教学要求的标准教室、计算机机房及配套的软件、加工中心及必要的刀具、夹具、量具和辅助设备等。

1.8　鉴定要求

1.8.1　适用对象

从事或准备从事本职业的人员。

1.8.2　申报条件

（1）中级（具备以下条件之一者）

1）经本职业中级正规培训达规定标准学时数，并取得结业证书。

2）连续从事本职业工作5年以上。

3）取得经劳动保障行政部门审核认定的，以中级技能为培养目标的中等以上职业学校本职业或相关专业毕业证书。

4）取得相关职业中级职业资格证书后，连续从事本职业2年以上。

（2）高级（具备以下条件之一者）

1）取得本职业中级职业资格证书后，连续从事本职业工作2年以上，经本职业高级正规培训，达到规定标准学时数，并取得结业证书。

2）取得本职业中级职业资格证书后，连续从事本职业工作4年以上。

3）取得经劳动保障行政部门审核认定的，以高级技能为培养目标的职业学校本职业（或相关专业）毕业证书。

4）大专以上本专业或相关专业毕业生，经本职业高级正规培训，达到规定标准学时数，并取得结业证书。

（3）技师（具备以下条件之一者）

1）取得本职业高级职业资格证书后，连续从事本职业工作4年以上，经本职业技师正规培训达规定标准学时数，并取得结业证书。

2）取得本职业高级职业资格证书的职业学校本职业（专业）毕业生，连续从事本职业工作2年以上，经本职业技师正规培训达规定标准学时数，并取得结业证书。

3）取得本职业高级职业资格证书的本科（含本科）以上本专业或相关专业的毕业生，连续从事本职业工作2年以上，经本职业技师正规培训达规定标准学时数，并取得结业证书。

（4）高级技师　取得本职业技师职业资格证书后，连续从事本职业工作4年以上，经本职业高级技师正规培训达规定标准学时数，并取得结业证书。

1.8.3　鉴定方式

分为理论知识考试和技能操作考核。理论知识考试采用闭卷方式，技能操作（含软件应用）考核采用现场实际操作和计算机软件操作方式。理论知识考试和技能操作（含软件应用）考核均实行百分制，成绩皆达60分及以上者为合格。技师和高级技师还需进行综合评审。

1.8.4　考评人员与考生配比

理论知识考试考评人员与考生配比为1:15，每个标准教室不少于2名相应级别的考评员；技能操作（含软件应用）考核考评员与考生配比为1:2，且不少于3名相应级别的考评员；综合评审委员不少于5人。

1.8.5　鉴定时间

理论知识考试为120min，技能操作考核中实操时间为：中级、高级不少于240min，技师和高级技师不少于300min，技能操作考核中软件应用考试时间为不超过120min，技师和高级技师的综合评审时间不少于45min。

1.8.6　鉴定场所设备

理论知识考试在标准教室里进行，软件应用考试在计算机机房进行，技能操作考核在配备必要的加工中心及必要的刀具、夹具、量具和辅助设备的场所进行。

2. 基本要求

2.1　职业道德

2.1.1　职业道德基本知识

2.1.2　职业守则

1）遵守国家法律、法规和有关规定。

2）具有高度的责任心、爱岗敬业、团结合作。

3）严格执行相关标准、工作程序与规范、工艺文件和安全操作规程。

4）学习新知识新技能、勇于开拓和创新。

5）爱护设备、系统及工具、夹具、量具。

6）着装整洁，符合规定；保持工作环境清洁有序，文明生产。

2.2　基础知识

2.2.1　基础理论知识

1）机械制图。

2）工程材料及金属热处理知识。

3）机电控制知识。

4）计算机基础知识。

5）专业英语基础。

2.2.2　机械加工基础知识

1）机械原理。

2）常用设备知识（分类、用途、基本结构及维护保养方法）。

3）常用金属切削刀具知识。

4）典型零件加工工艺。

5）设备润滑和切削液的使用方法。

6）工具、夹具、量具的使用与维护知识。

7）铣工、镗工基本操作知识。

2.2.3　安全文明生产与环境保护知识

1）安全操作与劳动保护知识。

2）文明生产知识。

3）环境保护知识。

2.2.4　质量管理知识

1）企业的质量方针。

2）岗位质量要求。

3）岗位质量保证措施与责任。

2.2.5　相关法律、法规知识

1）劳动法的相关知识。

2）环境保护法的相关知识。

3）知识产权保护法的相关知识。

3. 工作要求

本标准对中级、高级、技师和高级技师的技能要求依次递进，高级别涵盖低级别的要求。

3.1　中级（表 A-1）

表 A-1　中级的工作要求

职业功能	工作内容	技能要求	相关知识
加工准备	读图与绘图	① 能读懂中等复杂程度（如凸轮、箱体、多面体）的零件图 ② 能绘制有沟槽、台阶、斜面的简单零件图 ③ 能读懂分度头尾架、弹簧夹头套筒、可转位铣刀结构等简单机构装配图	① 复杂零件的表达方法 ② 简单零件图的画法 ③ 零件三视图、局部视图和剖视图的画法
	制订加工工艺	① 能读懂复杂零件的数控加工工艺文件 ② 能编制直线、圆弧面、孔系等简单零件的数控加工工艺文件	① 数控加工工艺文件的制定方法 ② 数控加工工艺知识
	零件定位与装夹	① 能使用加工中心常用夹具（如压板、机用平口钳等）装夹零件 ② 能够选择定位基准，并找正零件	① 加工中心常用夹具的使用方法 ② 定位、装夹的原理和方法 ③ 零件找正的方法
	刀具准备	① 能够根据数控加工工艺卡选择、安装和调整加工中心常用刀具 ② 能根据加工中心特性、零件材料 、加工精度和工作效率等选择刀具和刀具几何参数，并确定数控加工需要的切削参数和切削用量 ③ 能够使用刀具预调仪或者在机内测量工具的半径及长度 ④ 能够选择、安装、使用刀柄 ⑤ 能够刃磨常用刀具	① 金属切削与刀具磨损知识 ② 加工中心常用刀具的种类、结构和特点 ③ 加工中心、零件材料、加工精度和工作效率对刀具的要求 ④ 刀具预调仪的使用方法 ⑤ 刀具长度补偿、半径补偿与刀具参数的设置知识 ⑥ 刀柄的分类和使用方法 ⑦ 刀具刃磨的方法

（续）

职业功能	工作内容	技能要求	相关知识
数控编程	手工编程	① 能够编制钻、扩、铰、镗等孔类加工程序 ② 能够编制平面铣削程序 ③ 能够编制含直线插补、圆弧插补二维轮廓的加工程序	① 数控编程知识 ② 直线插补和圆弧插补的原理 ③ 坐标点的计算方法 ④ 刀具补偿的作用和计算方法
	计算机辅助编程	能够利用 CAD/CAM 软件完成简单平面轮廓的铣削程序	① CAD/CAM 软件的使用方法 ② 平面轮廓的绘图与加工代码生成方法
加工中心操作	操作面板	① 能够按照操作规程起动及停止机床 ② 能使用操作面板上的常用功能键（如回零、手动、MDI、修调等）	① 加工中心操作说明书 ② 加工中心操作面板的使用方法
	程序输入与编辑	① 能够通过各种途径（如 DNC、网络）输入加工程序 ② 能够通过操作面板输入和编辑加工程序	① 数控加工程序的输入方法 ② 数控加工程序的编辑方法
	对刀	① 能进行对刀并确定相关坐标系 ② 能设置刀具参数	① 对刀的方法 ② 坐标系的知识 ③ 建立刀具参数表或文件的方法
	程序调试与运行	① 能够进行程序检验、单步执行、空运行并完成零件试切 ② 能够使用交换工作台	① 程序调试的方法 ② 工作台交换的方法
	刀具管理	① 能够使用自动换刀装置 ② 能够在刀库中设置和选择刀具 ③ 能够通过操作面板输入有关参数	① 刀库的知识 ② 刀库的使用方法 ③ 刀具信息的设置方法与刀具选择 ④ 数控系统中加工参数的输入方法
零件加工	平面加工	能够运用数控加工程序进行平面、垂直面、斜面、阶梯面等铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT7 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	① 平面铣削的基本知识 ② 刀具端刃的切削特点
	型腔加工	1）能够运用数控加工程序进行直线、圆弧组成的平面轮廓零件铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	① 平面轮廓铣削的基本知识 ② 刀具侧刃的切削特点

（续）

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
零件加工	型腔加工	2）能够运用数控加工程序进行复杂零件的型腔加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3. 2μm	① 平面轮廓铣削的基本知识 ② 刀具侧刃的切削特点
	曲面加工	能够运用数控加工程序铣削圆锥面、圆柱面等简单曲面，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3. 2μm	① 曲面铣削的基本知识 ② 球头刀具的切削特点
	孔系加工	能够运用数控加工程序进行孔系加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT7 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3. 2μm	麻花钻、扩孔钻、丝锥、镗刀及铰刀的加工方法
	槽类加工	能够运用数控加工程序进行槽、键槽的加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3. 2μm	槽、键槽的加工方法
	精度检验	能够使用常用量具进行零件的精度检验	① 常用量具的使用方法 ② 零件精度检验及测量方法
维护与故障诊断	加工中心日常维护	能够根据说明书完成加工中心的定期及不定期维护保养，包括机械、电气、液压、数控系统检查和日常保养等	① 加工中心说明书 ② 加工中心日常保养方法 ③ 加工中心操作规程 ④ 数控系统（进口、国产数控系统）说明书
	加工中心故障诊断	① 能读懂数控系统的报警信息 ② 能发现加工中心的一般故障	① 数控系统的报警信息 ② 机床的故障诊断方法
	机床精度检查	能进行机床水平的检查	① 水平仪的使用方法 ② 机床垫铁的调整方法

3.2 高级（表 A-2）

表 A-2 高级的工作要求

职业功能	工作内容	技能要求	相关知识
加工准备	读图与绘图	① 能够读懂装配图并拆画零件图 ② 能够测绘零件 ③ 能够读懂加工中心主轴系统、进给系统的机构装配图	① 根据装配图拆画零件图的方法 ② 零件的测绘方法 ③ 加工中心主轴与进给系统基本构造知识
	制订加工工艺	能编制箱体类零件的加工中心加工工艺文件	箱体类零件数控加工工艺文件的制定
	零件定位与装夹	① 能根据零件的装夹要求正确选择和使用组合夹具和专用夹具 ② 能选择和使用专用夹具装夹异型零件 ③ 能分析并计算加工中心夹具的定位误差 ④ 能够设计与自制装夹辅具（如轴套、定位件等）	① 加工中心组合夹具和专用夹具的使用、调整方法 ② 专用夹具的使用方法 ③ 夹具定位误差的分析与计算方法 ④ 装夹辅具的设计与制造方法
	刀具准备	① 能够选用专用工具 ② 能够根据难加工材料的特点，选择刀具的材料、结构和几何参数	① 专用刀具的种类、用途、特点和刃磨方法 ② 切削难加工材料时的刀具材料和几何参数的确定方法
数控编程	手工编程	① 能够编制较复杂的二维轮廓铣削程序 ② 能够运用固定循环、子程序进行零件的加工程序编制 ③ 能够运用变量编程	① 较复杂二维节点的计算方法 ② 球、锥、台等几何体外轮廓节点计算 ③ 固定循环和子程序的编程方法 ④ 变量编程的规则和方法
	计算机辅助编程	① 能够利用 CAD/CAM 软件进行中等复杂程度的实体造型（含曲面造型） ② 能够生成平面轮廓、平面区域、三维曲面、曲面轮廓、曲面区域、曲线的刀具轨迹 ③ 能进行刀具参数的设定 ④ 能进行加工参数的设置 ⑤ 能确定刀具的切入切出位置与轨迹 ⑥ 能够编辑刀具轨迹 ⑦ 能够根据不同的数控系统生成 G 代码	① 实体造型的方法 ② 曲面造型的方法 ③ 刀具参数的设置方法 ④ 刀具轨迹生成的方法 ⑤ 各种材料切削用量的数据 ⑥ 有关刀具切入切出的方法对加工质量影响的知识 ⑦ 轨迹编辑的方法 ⑧ 后置处理程序的设置和使用方法
	数控加工仿真	能利用数控加工仿真软件实施加工过程仿真、加工代码检查与干涉检查	数控加工仿真软件的使用方法
加工中心操作	程序调试与运行	能够在机床中断加工后正确恢复加工	加工中心的中断与恢复加工的方法
	在线加工	能够使用在线加工功能，运行大型加工程序	加工中心的在线加工方法

（续）

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
零件加工	平面加工	能够编制数控加工程序进行平面、垂直面、斜面、阶梯面等铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT7 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm	平面铣削的加工方法
	型腔加工	能够编制数控加工程序进行模具型腔加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm	模具型腔的加工方法
	曲面加工	能够使用加工中心进行多轴铣削加工叶轮、叶片，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm	叶轮、叶片的加工方法
	孔类加工	1）能够编制数控加工程序相贯孔加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm 2）能进行调头镗孔，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT7 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm 3）能够编制数控加工程序进行刚性攻丝，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm	相贯孔加工、调头镗孔、刚性攻螺纹的方法
	沟槽加工	1）能够编制数控加工程序进行深槽、特形沟槽的加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm 2）能够编制数控加工程序进行螺旋槽、柱面凸轮的铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 *Ra*3.2μm	深槽、特形沟槽、螺旋槽、柱面凸轮的加工方法
	配合件加工	能够编制数控加工程序进行配合件加工，尺寸配合公差等级达 IT8	① 配合件的加工方法 ② 尺寸链换算的方法

（续）

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
零件加工	精度检验	① 能对复杂、异形零件进行精度检验 ② 能够根据测量结果分析产生误差的原因 ③ 能够通过修正刀具补偿值和修正程序来减少加工误差	① 复杂、异形零件的精度检验方法 ② 产生加工误差的主要原因及其消除方法
维护与故障诊断	日常维护	能完成加工中心的定期维护保养	加工中心的定期维护手册
	故障诊断	能发现加工中心的一般机械故障	① 加工中心机械故障和排除方法 ② 加工中心液压原理和常用液压元件
	机床精度检验	能够进行机床几何精度和切削精度检验	机床几何精度和切削精度检验内容及方法

3.3 技师（表 A-3）

表 A-3 技师的工作要求

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
加工准备	读图与绘图	① 能绘制普通工装装配图 ② 能读懂常用加工中心的机械原理图及装配图 ③ 能够读懂加工中心自动换刀系统、旋转工作台分度机构的装配图 ④ 能够读懂高速铣床/加工中心电主轴系统的装配图	① 工装装配图的画法 ② 常用加工中心的机械原理图及装配图的画法 ③ 加工中心换刀系统、旋转工作台分度机构的基本构造知识 ④ 高速铣床/加工中心电主轴结构与功能的基本知识
	制订加工工艺	① 能编制高难度、高精度箱体类、支架类等复杂零件、易变形零件的数控加工工艺文件 ② 能对零件的数控加工工艺进行合理性分析，并提出改进建议 ③ 能够确定高速加工的工艺文件	① 精密与复杂零件的工艺分析方法 ② 数控加工工艺方案合理性的分析方法及改进措施 ③ 高速加工的原理
	零件定位与装夹	① 能设计与制作高精度箱体类，叶片、螺旋桨等复杂零件的专用夹具 ② 能对加工中心夹具进行误差分析并提出改进建议	① 专用夹具的设计与制造方法 ② 加工中心夹具的误差分析及消减方法
	刀具准备	① 能够依据切削条件和刀具条件估算刀具的使用寿命，并设置相关参数 ② 能根据难加工材料合理选择刀具材料和切削参数 ③ 能推广使用新知识、新技术、新工艺、新材料、新型刀具 ④ 能进行刀具刀柄的优化使用，提高生产效率，降低成本 ⑤ 能选择和使用适合高速切削的工具系统	① 切削刀具的选用原则 ② 延长刀具寿命的方法 ③ 刀具新材料、新技术知识 ④ 刀具使用寿命的参数设定方法 ⑤ 难切削材料的加工方法 ⑥ 高速加工的工具系统知识

（续）

职业功能	工作内容	技能要求	相关知识
数控编程	手工编程	能够根据零件与加工要求编制具有指导性的变量编程程序	变量编程的概念及其编制方法
	计算机辅助编程	① 能够利用计算机高级语言编制特殊曲线轮廓的铣削程序 ② 能够利用计算机 CAD/CAM 软件对复杂零件进行实体或曲线曲面造型 ③ 能够编制复杂零件的三轴联动铣削程序 ④ 能够编制四轴或五轴联动铣削程序	① 计算机高级语言知识 ② CAD/CAM 软件的使用方法 ③ 加工中心四轴、五轴联动的加工方法
	数控加工仿真	能够利用数控加工仿真软件分析和优化数控加工程序	数控加工仿真软件的使用方法
加工中心操作	程序调试与运行	能够操作立式、卧式加工中心以及高速铣床/加工中心	立式、卧式加工中心以及高速铣床/加工中心的操作方法
	刀具信息与参数设置	能够针对机床现状调整数控系统相关参数	数控系统参数的调整方法
零件加工	特殊材料加工	能够进行特殊材料零件的铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	① 特殊材料的材料学知识 ② 特殊材料零件的铣削加工方法
	箱体加工	能够进行复杂箱体类零件加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	复杂箱体零件的加工方法
	曲面加工	能够使用四轴以上铣床与加工中心进行对叶片、螺旋桨等复杂零件进行多轴铣削加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT8 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	四轴以上铣床/加工中心的使用方法
	孔系加工	能够进行多角度孔加工，并达到如下要求： ① 尺寸公差等级达 IT7 ② 形位公差等级达 IT8 ③ 表面粗糙度达 $Ra3.2\mu m$	多角度孔的加工方法
	精度检验	能够进行大型、精密零件的精度检验	① 精密量具的使用方法 ② 精密零件的精度检验方法

（续）

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
维护与故障诊断	加工中心日常维护	能借助字典阅读数控设备的主要外文信息	加工中心专业外文知识
	加工中心故障诊断	能够分析和排除机械故障	加工中心常见故障诊断及排除方法
	机床精度检验	能够进行机床定位精度、重复定位精度的检验	机床定位精度检验、重复定位精度检验的内容及方法
培训与管理	操作指导	能指导本职业中级、高级进行实际操作	操作指导书的编制方法
	理论培训	能对本职业中级、高级进行理论培训	培训教材的编写方法
	质量管理	能在本职工作中认真贯彻各项质量标准	相关质量标准
	生产管理	能协助部门领导进行生产计划、调度及人员的管理	生产管理基本知识
	技术改造与创新	能够进行加工工艺、夹具、刀具的改进	数控加工工艺综合知识

3.4 高级技师（表 A-4）

表 A-4 高级技师的工作要求

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
工艺分析与设计	读图与绘图	① 能绘制复杂工装装配图 ② 能读懂常用加工中心高速铣床/加工中心的电气、液压原理图 ③ 能够组织中级、高级、技师进行工装协同设计	① 复杂工装设计方法 ② 常用加工中心电气、液压原理图的画法 ③ 协同设计知识
	制订加工工艺	① 能对高难度、高精密零件的数控加工工艺方案进行合理性分析，提出改进意见并参与实施 ② 能够确定高速加工的工艺方案 ③ 能够确定细微加工的工艺方案	① 复杂、精密零件机械加工工艺的系统知识 ② 高速加工机床的知识 ③ 高速加工的工艺知识 ④ 细微加工的工艺知识
	零件定位与装夹	① 能独立设计加工中心的复杂夹具 ② 能在四轴和五轴数控加工中对由夹具精度引起的零件加工误差进行分析，提出改进方案，并组织实施	① 复杂加工中心夹具的设计及使用知识 ② 复杂夹具的误差分析及消减方法 ③ 多轴数控加工的方法
	刀具准备	① 能根据零件要求设计专用刀具，并提出制造方法 ② 能系统地讲授各种切削刀具的特点和使用方法	① 专用刀具的设计与制造知识 ② 切削刀具的特点和使用方法

（续）

职业功能	工作内容	技 能 要 求	相 关 知 识
零件加工	异形零件加工	能解决高难度、异形零件加工的技术问题，并制订工艺措施	高难度零件的加工方法
	精度检验	能够设计专用检具，检验高难度、异形零件	检具设计知识
机床维护与精度检验	数控铣床维护	① 能借助字典看懂数控设备的主要外文技术资料 ② 能够针对机床运行现状合理调整数控系统相关参数	数控铣床专业外文知识
	机床精度检验	能够进行机床定位精度、重复定位精度的检验	机床定位精度、重复定位精度的检验和补偿方法
	数控设备网络化	能够借助网络设备和软件系统实现数控设备的网络化管理	数控设备网络接口及相关技术
培训与管理	操作指导	能指导本职业中级、高级和技师进行实际操作	操作理论教学指导书的编写方法
	理论培训	① 能对本职业中级、高级和技师进行理论培训 ② 能系统地讲授各种切削刀具的特点和使用方法	① 教学计划与大纲的编制方法 ② 切削刀具的特点和使用方法
	质量管理	能应用全面质量管理知识，实现操作过程的质量分析与控制	质量分析与控制方法
	技术改造与创新	能够组织实施技术改造和创新，并撰写相应的论文	科技论文的编写方法

4. 比重表

4.1　理论知识（表 A-5）

表 A-5　理论知识比重表

项　　目		中级（%）	高级（%）	技师（%）	高级技师（%）
基本要求	职业道德	5	5	5	5
	基础知识	20	20	15	15
相关知识	加工准备	15	15	25	—
	数控编程	20	20	10	—
	加工中心操作	5	5	5	—
	零件加工	30	30	20	15
	机床维护与精度检验	5	5	10	10

（续）

项　　目		中级（%）	高级（%）	技师（%）	高级技师（%）
相关知识	培训与管理	—	—	10	15
	工艺分析与设计	—	—	—	40
合　　计		100	100	100	100

4.2　技能操作（表 A-6）

表 A-6　技能操作比重表

项　　目		中级（%）	高级（%）	技师（%）	高级技师（%）
技能要求	加工准备	10	10	10	—
	数控编程	30	30	30	—
	加工中心操作	5	5	5	—
	零件加工	50	50	45	45
	机床维护与精度检验	5	5	5	10
	培训与管理	—	—	5	10
	工艺分析与设计	—	—	—	35
合　　计		100	100	100	100

附录 B

机床行业职业技能要求补充

北京京城机电控股有限责任公司的主业之一是生产数控机床，尤其是各式加工中心。因此作为该公司的职工，对于加工中心的结构与性能应该有较深入的了解，在加工中心操作技能方面必须有更高的水平，这是精密机床生产的需要，也是提出技能要求补充的原因。

机械零件的特点如下：

1）形状比较规整，因此在图样上的反映比较直观，但是由于零件的相关特性要求很多，稍有疏忽就会产生废品，许多大型零件必须通过多个视图才能完整地反映相关信息。

2）箱体类零件较多，不仅是表面粗糙度有要求，对于零件的尺寸公差、几何公差要求更严格，这些零件质量的优劣影响了机床的整体性能。

3）大型零件多，工件找正困难，在装夹过程中容易变形，严重影响其几何公差的要求，因此对于机床操作的要求很严格。在兼顾效率与质量的前提下，更注重质量。由于毛坯的价值高，操作者应确保不加工出废品。

针对以上特点，对加工中心操作者的要求如下：

1）要有强烈的责任心和事业心，操作者操作的机床是工作母机，必须精心操作、认真保养，保持机床的制造精度，延长使用寿命。时刻牢记机床精度是产品质量的保证。

2）充分掌握读图知识与技巧，能够全面、正确地理解设计要求。

3）熟练掌握机床操作的各个环节，特别在操作工艺方面，粗加工装夹要保证切削过程的稳定，精加工装夹要保证零件不变形。尤其是一些大型、关键零件的几何精度直接与整机的静态精度息息相关，从零件的装夹和找正开始就要严格执行工艺文件要求。操作者可能长期加工同一种工件，但不能长期停留在同一个加工水平。

4）相比其他行业，机床行业对操作者的镗孔技术要求更高。许多关键孔的表面粗糙度要求很严格，因为表面粗糙度影响着配合质量与使用寿命；而几何精度、尺寸精度则要求更为严格，尤其是尺寸一旦加工不到位，再进行调整是很困难的。例如主轴

孔的尺寸公差带只有 0.006mm，如果不能使尺寸一刀进入公差将会带来很大的麻烦。另外还有一些相关的工艺技术要求，比如大直径尺寸测量，熟练掌握精镗刀的切削参数、避免刀尖过度磨损产生锥度等，这些要求不是短时间内可以掌握的，需要操作者仔细摸索规律，认真总结经验。

5）深入了解机床结构，熟悉数控系统的组成及工作原理，特别是参数的意义与使用等方面的知识，掌握一定的机床维修、保养以及调整技巧，对充分发挥设备的潜力具有重要作用。

附录 C

FANUC 0i-MC 系统代码表

数控加工中心的操作系统有很多种，表 C-1 为 FANUC 0i-MC 系统 G 代码表。G 代码被分为了不同的组，这是由于大多数的 G 代码是模态的，所谓模态 G 代码，是指

表 C-1　FANUC 0i-MC 系统 G 代码表

代码	分组	功　能	代码	分组	功　能
* G00	01	快速定位	* 54	12	选择工件坐标系 1
G01		直线插补	G55		选择工件坐标系 2
G02		顺时针方向圆弧插补	G56		选择工件坐标系 3
G03		逆时针方向圆弧插补	G57		选择工件坐标系 4
G04	00	暂停	G58		选择工件坐标系 5
G09		准确停止检验	G59		选择工件坐标系 6
G10		自动程序原点补正，刀具补正设定	G61	15	精确停止方式
* G17	02	*XY* 平面选择	G62		自动拐角倍率
G18		*ZX* 平面选择	G63		攻螺纹方式
G19		*YZ* 平面选择	* G64		切削方式
G20	06	寸制单位输入选择	G65	00	宏程序非模态调用
G21		米制单位输入选择	G73	09	深孔钻削循环
* G27	00	参考点返回监测	G74		左螺纹攻螺纹循环
G28		参考点返回	G76		精镗孔循环
G29		从参考点返回	* G80		取消固定循环
G30		返回第 2、3、4 参考点	G81		钻、锪镗孔循环
G33	01	螺纹切削	G82		钻削循环
* G40	07	刀具半径补偿取消	G83	09	深孔钻削循环
G41		刀具半径左补偿	G84		攻右旋螺纹循环
G42		刀具半径右补偿	G85		铰孔循环
G43	08	正向刀具长度补偿	G86		背镗孔循环
G44		负向刀具长度补偿	* G90	03	绝对值指令方式
* G49		刀具长度补偿取消	G91		增量值指令方式
* G50	11	比例缩放取消	G92	00	设定工作坐标系
G51		比例缩放有效	* G94	05	每分钟进给
G52	00	局部坐标系设定	* G98	10	固定循环返回初始点
G53		选择机床坐标系	G99		固定循环返回 R 点

这些 G 代码不只在当前的程序段中起作用，而且在以后的程序段中一直起作用，直到程序中出现另一个同组的 G 代码为止，同组的模态 G 代码控制同一个目标但起不同的作用，它们之间是不相容的。00 组的 G 代码是非模态的，这些 G 代码只在它们所在的程序段中起作用。标有“＊”号的 G 代码是电源接通时的初始状态。对于 G00、G01、G90 和 G91 上电时的初始状态由参数决定。

如果程序中出现了未列在表中的 G 代码，CNC 会显示 10 号报警。同一程序段中可以有几个 G 代码，但当两个或两个以上的同组 G 代码出现时，最后出现的一个（同组的）G 代码有效。在固定循环模态下，任何一个 01 组的 G 代码都将使固定循环模态自动取消，成为 G80 模态。

表 C-2 为 FANUC 0i-MC 系统 M 代码表，通常 M 功能除某些通用性的标准码外（如 M03、M05、M08、M09 和 M30 等），也可由制造厂商依其机械动作要求，设计出不同的 M 指令，以控制不同的开/关动作，或预留 I/O（输入/输出）接点，作为用户自行连接其他外围设备使用。

在同一段程序中若有两个 M 代码出现时，随其动作不相冲突，但排列在最后面的 M 代码有效，前面的 M 代码被忽略而不执行。表中标 W 的为前指令码，标 A 的为后指令码。前指令码和同一程序段中的移动指令同时执行，后指令码在同段的移动指令执行完后才执行。

表 C-2　FANUC 0i-MC 系统 M 代码表

代码	功　能		代码	功　能	
M00	程序暂停	A	M07	雾状切削液开	W
M01	程序选择停止	A	M08	液状切削液开	W
M02	程序结束	A	M09	切削液关	A
M03	主轴旋转（正转）	W	M19	主轴定向	A
M04	主轴旋转（反转）	W	M30	程序结束并返回	A
M05	主轴停转	A	M98	子程序调用指令	A
M06	刀具交换	W	M99	子程序结束，并返回主程序	A

附录 D

SIEMENS 828D 系统代码表

SIEMENS 828D 系统的 G 功能分为不同的功能组。在一个程序段中只能编写某组的一个 G 功能。G 功能可以是模态的（直到被同组中其他功能替代），或者是逐段式的（只在写入的程序段中有效）。SIEMENS 828D 系统的 G 代码仅为整数 G 代码表见表 D-1。

表 D-1　SIEMENS 828D 系统 G 代码表

代　码	功　能	说明（m 为模态，s 为逐段式）
G0	快速移动	m；选择各轴的进给方式
G1	直线插补	
G2	顺时针圆弧插补	
G3	逆时针圆弧插补	
G4	停留时间	s
G9	准停	s
G17	选择工作平面 *X/Y*	m；选择工作坐标系平面
G18	选择工作平面 *Z/X*	
G19	选择工作平面 *Y/Z*	
G25	工作区域下限	s
G26	工作区域上限	s
G33	螺纹切削，等螺距	m
G34	螺纹切削，增螺距	
G40	刀具半径补偿“关”	m
G41	刀具半径补偿，轮廓左边	
G42	刀具半径补偿，轮廓右边	
G53	抑制当前零点偏移（程序段方式）	s
G54 ~ G57	可设定的零点偏移	m
G58	可编程的轴向绝对零点粗偏	s
G59	可编程的轴向增量零点精偏	s
G70	寸制尺寸（长度）	m
G71	米制尺寸（长度）	

（续）

代　码	功　能	说明（m 为模态，s 为逐段式）
G74	回参考点运行	s
G75	回固定点运行	
G90	绝对尺寸输入	m
G91	增量尺寸输入	
G93	按照时间倒数进给，单位：1/min	m；选择编程的速度方式
G94	直线进给率 F，单位：mm/min 或 in/min 和(°)/min	
G95	转速进给 F，单位 mm/r 或者 in/r	
G96	恒定切削速度“开”	
G97	恒定切削速度“关”	
G331	正向螺距，右旋螺纹	m；选择各轴的进给方式。不带弹性卡头的螺纹切削
G332	负向螺距，左旋螺纹	
G450	过渡圆弧	m
G451	等距离交点	
G500	取消所有可设定的框架，基本框架激活	m

表 D-2 中所列是在数控系统中已经规定的 M 代码，其他所有空的 M 代码的功能可以由机床制造商预设。依机床种类不同其中会有取舍、补充。有关详情见机床说明书。

表 D-2　SIEMENS 828D 系统 M 代码表

代　码	功　能	代　码	功　能
M0	程序暂停	M30	程序结束，同 M2
M1	程序选择停止	M40	自动齿轮换档
M2	程序结束	M41 ~ M45	齿轮级 1 ~ 5
M3	主轴旋转（正转）	M70	主轴转换到轴运行方式
M4	主轴旋转（反转）		
M5	主轴停转		
M6	刀具交换		
M17	子程序结束		
M19	主轴运动到 SD43240 指定的位置		

表 D-3 中只是列出了常用指令代码表，具体的使用方法及其他的指令请参考数控系统自身附带的编程手册。

表 D-3　SIEMENS 828D 系统代码表　指令表

指　令	功　能	指　令	功　能
:	NC 主程序段号、跳转标记结束、连接运算符	ABS	取绝对值
+ − * /	四则运算符	SIN、ASIN COS、ACOS TAN	三角函数
< <= > >=	关系运算符	TOFFL TOFF TOFFR	可编程的刀具补偿偏移
AND NOT XOR OR	逻辑运算符	ROT AROT	可编程的旋转
CALL	间接调用子程序	SCALE ASCALE	可编程缩放
CASE	有条件跳转	TRANS ATRANS	零点偏移
“/”	在程序段最前面，程序段跳转	T	T 指令备刀
D	刀具补偿号	MSG	输出提示信息
F	进给值（当 F 和 G4 同时使用，F 则表示暂停时间）	MIRROR AMIRROR	可编程的镜像
GOTO GOTOB GOTOC	跳转指令		

附录 E

大隈系统代码表

表 E-1　大隈系统 G 代码表

G 代码	G 组	功　　能
G00 * * *	1	定位
G01 * * *		直线插补
G02		圆弧插补，螺旋切削（顺时针）
G03		圆弧插补，螺旋切削（逆时针）
G04 * *	2	停顿
G05		
G06		
G07		
G08		
G09 * *	18	准确停止
G10 *	3	取消 G11
G11		坐标系的平移和旋转移位
G12		
G13		
G14		
G15	4	工作坐标系的选择（状态码）
G16 * *		工作坐标系的选择（非状态码）
G17 * * *	5	平面选择：*XY*
G18 * * *		平面选择：*ZX*
G19 * * *		平面选择：*YZ*
G20 * *	15	寸制输入确定
G21 * *		米制输入确定
G22 * * *	6	可编程极限打开
G23 * * *		可编程极限取消
G24		

（续）

G 代码	G 组	功　能
G25		
G26		
G27		
G28		
G29		
G30 **	16	返回起始位置
G31	17	跳跃功能
G32		
G33		
G34		
G35		
G36		
G37		
G38		
G39		
G40 *	7	刀具半径补偿取消
G41		刀具半径补偿，左
G42		刀具半径补偿，右
G43 *	8	三维位移取消
G44		三维位移执行
G45		
G46		
G47		
G48		
G49		
G50 *	9	几何尺寸的放大和缩小取消
G51		几何尺寸的放大和缩小执行
G52		
G53 ***	10	刀具长度位移取消
G54		刀具长度位移，*X* 轴
G55		刀具长度位移，*Y* 轴
G56 ***		刀具长度位移，*Z* 轴
G57		刀具长度位移，第 4 轴

（续）

G 代码	G 组	功　　能
G58		刀具长度位移，第 5 轴
G59		刀具长度位移，第 6 轴
G60	1	单向定位
G61	14	准确停止模式
G62	19	可编程镜像
G63		
G64 *	14	切削模式（G61 取消）
G65		
G66		
G67		
G68		
G69		
G70		
G71	21	M53 返回平面的指定
G72		
G73	11	固定循环，高速深孔钻孔循环
G74		固定循环，反向攻螺纹循环
G75		
G76	11	固定循环，精镗
G77		
G78		
G79		
G80	11	固定循环，模式取消
G81		固定循环，钻孔循环
G82		固定循环，钻孔循环
G83		固定循环，深孔钻孔循环
G84		固定循环，攻螺纹循环
G85		固定循环，镗孔循环
G86		固定循环，镗孔循环
G87		固定循环，反镗循环
G88		固定循环，镗孔循环
G89	11	固定循环，镗孔循环
G90 * * *	20	绝对坐标模式

（续）

G 代码	G 组	功　能
G91 ***	12	增量坐标模式
G92	20	设定工作坐标系
G93		
G94 ***	13	每分钟进给模式
G95 ***		每转进给模式
G96		
G97		
G98		
G99		
G101	32	G 代码宏指令
G102		
G103		
G104		
G105		
G106		
G107		
G108		
G109		
G110		
G111		
G112		
G113		
G114		
G115		
G116		
G117		
G118		
G119		
G120		
G174	78	柱形侧切削关闭
G175		柱形侧切削打开

（续）

G 代码	G 组	功　　能
G186 G187	66	
G274	11	同步攻螺纹，反向攻螺纹循环
G284	11	同步攻螺纹，攻螺纹循环

注：“＊”指当电源供应打开时已被设定。“＊＊”指仅在指定的程序段中有效。“＊＊＊”指可有最初状态参数设定。

表 E-2　大隈系统 M 代码表

M 代码	组	功　　能	执行计时（参阅轴运动指令）	模态/逐段生效	备　　注
M00	1	程序停止	之后	逐段生效	轴和切削液停止（可以通过设定参数来选择）
M01		任选停止	之后	逐段生效	
M02	18	程序结束	之后	逐段生效	NC 重新设定
M03	2	主轴正转（顺时针旋转）	同时	模态	当从工作方向看，逆时针旋转工作轴。当从工作方向看，顺时针旋转工作轴
M04		主轴反转（逆时针旋转）	同时	模态	
M05		主轴停止	之后	模态	
M06	3	换刀指令	之后	逐段生效	
M07	8	油雾冷却开	同时	模态	
M08	10	冷却泵开	同时	模态	
M09	24	冷却系统关	之后	模态	执行 M09 时，之前的 M07、M08、M12、M50、M51 和 M59 均被关闭
M10	30	*A* 轴夹紧	之后	模态	
M11		*A* 轴松开	之后	模态	
M12	22	切削吹气开（喷嘴）	同时	模态	
M15	5	第四轴转台正转	同时	模态	
M16		第四轴转台反转	同时	模态	

（续）

M 代码	组	功　能	执行计时（参阅轴运动指令）	模态/逐段生效	备　注
M17	7	回转头反向分度	同时	逐段生效	指令只对M73 ~ M76 有效
M19	2	主轴定向（正转）	之后	模态	
M20	31	*B* 轴夹紧	之后	模态	
M21		*B* 轴松开	之后	模态	
M22	32	*Y* 轴夹紧	之后	模态	
M23		*Y* 轴松开	之后	模态	
M24	33	*Z* 轴夹紧	之后	模态	
M25		*Z* 轴松开	之后	模态	
M26	35	*C* 轴夹紧	之后	模态	
M27		*C* 轴松开	之后	模态	
M30	18	纸带结束	之后	单触	
M32	38	切削液挡板门关	同时	模态	
M33		切削液挡板门开	同时	模态	
M40	11	高速、中高速、中低速、低速档	同时	模态	主轴齿轮由主轴速度指令自动决定
M41		高速、中高速、中低速档	同时	模态	
M42		高速和中高速档	同时	模态	
M43		高速档	同时	模态	
M44		AAC 下一附加头清除（落地式）	同时	逐段生效	
M45		AAC 准备指令（落地式）	同时	逐段生效	F：底盘类型
M46		AAC 无下一附加头（落地式）	同时	逐段生效	T：工作台类型
M47		AAC 无下一附加头（床头式）	同时	逐段生效	
M48	38	AAC 无下一附加头清除（床头式）	同时	逐段生效	
M49		AAC 准备指令（床头式）	同时	逐段生效	
M50	23	通孔冷却液低压开	同时	模态	
M51		通孔冷却液高压开	同时	模态	
M52	12	固定循环，上限返回	同时	模态	
M53	13	固定循环，指定点返回	同时	模态	
M54		固定循环，R 点返回	同时	模态	

（续）

M 代码	组	功　　能	执行计时（参阅轴运动指令）	模态/逐段生效	备　　注
M57	34	W 轴夹紧	之后	模态	
M58		W 轴松开	之后	模态	
M59	25	切削吹气开（转接器）	同时	模态	
M60	4	托盘交换指令	之后	逐段生效	
M62		立式主轴刀具交换准备	之后	模态	
M63	21	ATC 无下一刀具	同时	逐段生效	
M64		下一刀具还刀	同时	逐段生效	
M65		ATC 准备（写入当前刀具）	同时	逐段生效	
M66	14	同一刀具连续交换（立卧）	同时	逐段生效	
M67		不同刀具连续交换（立卧）	同时	逐段生效	
M68		主轴刀具夹紧	之后	模态	
M69		主轴刀具松开	之后	模态	
M70	3	手动换刀	之后	逐段生效	
M71		附加头刀具手动换刀	之后	逐段生效	
M72		横向主轴刀具交换准备	之后	模态	
M73	15	回转主轴头，前端	之后	逐段生效	
M74		回转主轴头，左端	之后	逐段生效	
M75		回转主轴头，后端	之后	逐段生效	
M76		回转主轴头，右端	之后	逐段生效	
M77	3	横向主轴换刀	之后	逐段生效	
M78		横向主轴刀具夹紧	之后	模态	
M79		横向主轴刀具松开	之后	模态	
M81	27	W 轴自动定位 1	之后	逐段生效	
M82		W 轴自动定位 2	之后	逐段生效	
M83		W 轴自动定位 3	之后	逐段生效	
M84		W 轴自动定位 4	之后	逐段生效	
M85		W 轴自动定位 5	之后	逐段生效	
M87		油雾喷射	同时	逐段生效	对 M90，M91 和 M98 有效
M88		集尘器开	同时	模态	
M89		集尘器关	同时	模态	
M90		立式主轴油雾循环模式开	同时	模态	

（续）

M 代码	组	功　能	执行计时（参阅轴运动指令）	模态/逐段生效	备　注
M91		攻螺纹底孔切屑吹气循环开	同时	模态	用 M90 关闭
M98		横向主轴油雾循环模式开	同时	模态	
M101	4	选择托盘 1	之后	逐段生效	
M102		选择托盘 2	之后	逐段生效	
M103		选择托盘 3	之后	逐段生效	
M104		选择托盘 4	之后	逐段生效	
M105		选择托盘 5	之后	逐段生效	
M106		选择托盘 6	之后	逐段生效	
M107		选择托盘 7	之后	逐段生效	
M108		选择托盘 8	之后	逐段生效	
M109		选择托盘 9	之后	逐段生效	
M110		选择托盘 10	之后	逐段生效	
M111		选择托盘 11	之后	逐段生效	
M112		选择托盘 12	之后	逐段生效	
M115	6	第五轴转台正转	同时	模态	
M116		第五轴转台反转	同时	模态	
M118		主轴反转定向	之后	模态	
M119		主轴正/反转定位	之后	模态	
M120		喷淋冷却开	同时	模态	
M130	9	主轴未旋转时，可以执行 G01、G02 和 G03	同时	模态	
M131		主轴未旋转时，不能执行 G01、G02 和 G03	同时	模态	
M132	37	但程序段无效	同时	模态	
M133		但程序段有效	同时	模态	
M134	16	主轴倍率无效	同时	模态	
M135		主轴倍率有效	同时	模态	
M136	17	进给倍率无效	同时	模态	
M137		进给倍率有效	同时	模态	
M140	39	进给保持无效	同时	模态	
M141		进给保持有效	同时	模态	
M142		主轴过载检测无效	同时	模态	

（续）

M 代码	组	功　　能	执行计时（参阅轴运动指令）	模态/逐段生效	备　　注
M143		主轴过载检测有效	同时	模态	
M144	19	接触式传感器前进	之后	模态	
M145		接触式传感器后退	之后	模态	
M150	28	冷却系统，指定立式主轴	同时	模态	
M151		冷却系统，指定横向主轴	同时	模态	
M152		冷却系统，指定第三冷却组	同时	模态	
M153		冷却系统，指定第四冷却组	同时	模态	
M154	20	传感器吹气关	之后	模态	
M155		传感器吹气开	同时	模态	
M157		无下一附加头（第二 AAC）	之后	逐段生效	
M158		下一附加头清除（第二 AAC）	之后	逐段生效	
M159		AAC 准备指令（第二 AAC）	之后	逐段生效	
M160	4	PPC 托盘搬入	之后	逐段生效	
M161		PPC 托盘搬出	之后	逐段生效	
M166		ATC 当前刀具还刀循环指令	同时	逐段生效	
M170	3	AAC 交换附加头（落地式）	之后	逐段生效	F：底盘类型
M171		AAC 交换附加头（床头式）	之后	逐段生效	T：工作台类型
M172		长型刀具，换刀指令	之后	逐段生效	
M173		AAC 交换附加头（立柱右侧）	之后	逐段生效	柱类型
M176		灰尘收集模式，气流	同时	逐段生效	
M177	3	附加头换刀	之后	逐段生效	AT－ATC
M178	4	吸尘模式运行，开	同时	模态	
M179		吸尘模式运行，关	同时	模态	

附录 F
表面粗糙度

一、表面粗糙度定义

表面粗糙度，是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度。其两波峰或两波谷之间的距离（波距）很小（在1mm以下），用肉眼是难以区别的，因此它属于微观几何形状误差。

二、评定表面结构的参数及其数值系列

在国家标准 GB/T 1031—2009《产品几何技术规范（GPS）表面结构　轮廓法　表面粗糙度参数及其数值》中，用中线制（轮廓法）评定表面粗糙度。表面粗糙度参数从下列两项中选取：

1）轮廓算术平均偏差 *Ra*；

2）轮廓最大高度 *RZ*。

在幅度参数（峰和谷）常用的参数范围内（*Ra* 为 0.025 ~ 6.3μm，*RZ* 为 0.1 ~ 25μm）推荐优先选用 *Ra*。

轮廓的算术平均偏差 *Ra* 的数值见表 F-1。

表 F-1　轮廓的算术平均偏差 *Ra* 的数值　（单位：μm）

Ra	0.012	0.2	3.2	50
	0.025	0.4	6.3	100
	0.05	0.8	12.5	
	0.1	1.6	25	

轮廓的最大高度 *RZ* 的数值见表 F-2。

表 F-2　轮廓的最大高度 *RZ* 的数值　（单位：μm）

RZ	0.025	0.4	6.3	100	1600
	0.05	0.8	12.5	200	
	0.1	1.6	25	400	
	0.2	3.2	50	800	

三、表面粗糙度符号及其注法

表面粗糙度符号及其注法见表 F-3，表面粗糙度标记示例见表 F-4。表面粗糙度要求在图样上的标记示例见表 F-5。

表 F-3　表面粗糙度符号代号及其注法

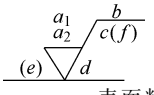
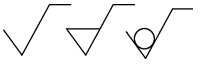
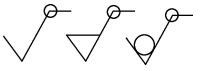
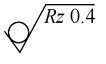
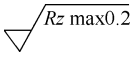
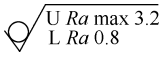
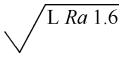
表面粗糙度符号及意义		表面粗糙度数值及其有关的规定在符号中注写的位置
符　　号	意义及说明	
	基本符号，表示表面可用任何方法获得，当不加注粗糙度参数值或有关说明（例如表面处理、局部热处理状况等）时，仅适用于简化代号标注	 a_1、a_2——表面粗糙度高度参数代号及其数值，μm； b——加工要求、镀覆、涂覆、表面处理或其他说明等； c——取样长度，mm；或波纹度 μm； d——加工纹理方向符号； e——加工余量，mm； f——表面粗糙度间距参数值（mm）或轮廓支承长度率
	基本符号上加一短画，表示表面是用去除材料方法获得。例如车、铣、钻、磨、剪切、抛光、腐蚀、电火花加工、气割等	
	基本符号上加一小圆，表示表面是用不去除材料的方法获得，例如铸、锻、冲压变形、热轧、冷轧、粉末冶金等。或者是用于保持原供应状况的表面（包括保持上道工序的状况）	
	在上述三个符号的长边上均可加一横线，用于标注有关参数和说明	
	在上述三个符号上均可加一小圆，表示所有表面具有相同的表面粗糙度要求	

表 F-4　表面粗糙度标记示例

标记示例	含　　义
	表示不允许去除材料，单向上限值，默认传输带，轮廓最大高度 0.4μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
	表示去除材料，单向上限值，轮廓最大高度的最大值 0.2μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“最大规则”
	表示不允许去除材料，双向极限值，两极限均使用默认传输带，上限值：算术平均偏差 3.2μm，默认评定长度，“最大规则”。下限值：算术平均偏差 0.8μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
	表示任意加工方法，默认传输带，单向下限值，算术平均偏差 1.6μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）

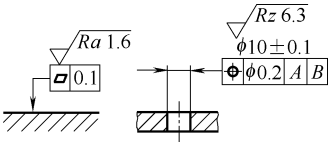
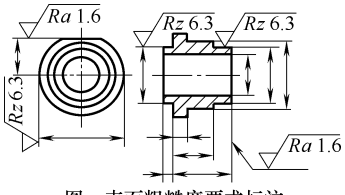
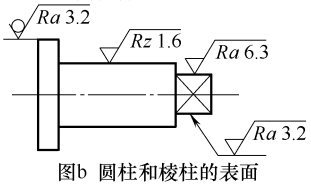
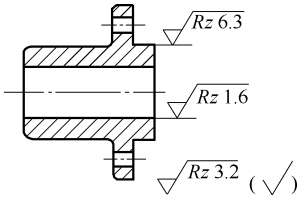
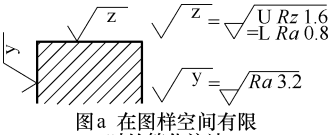
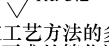
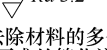
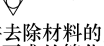
（续）

标记示例	含　义
0.008−0.8/*Ra* 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带 0.008～0.8mm，算术平均偏差 3.2μm，评定长度为 5 个取样长度（默认），“16% 规则”（默认）
−0.8/*Ra* 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带：根据国家标准 GB/T 6062，取样长度 0.8μm，算术平均偏差 3.2μm，评定长度包含 3 个取样长度，“16% 规则”（默认）
磨 *Ra* 1.6 ⊥ −2.5/*Rz*max 6.3	两个单向上限值： ① *Ra* = 1.6μm； “16% 规则”（默认）；默认传输带，默认评定长度 ② *Rz*max = 6.3μm； 最大规则；传输带 −2.5μm；默认评定长度 表面纹理垂直于视图的投影面；加工方法；磨削
铣 0.008−4/*Ra* 50 C0.008−4/*Ra* 6.3	双向极限值：上限值 *Ra* = 50μm，下限值 *Ra* = 6.3μm 两个传输带均为 0.008～4mm； 默认的评定长度为 5 × 4mm = 20mm； “16% 规则”（默认）； 表面纹理呈近似同心圆且圆心与表面中心相关； 加工方法：铣

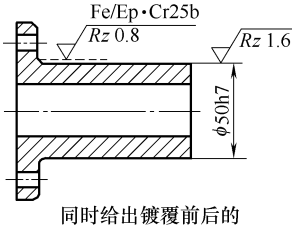
表 F-5　表面粗糙度要求在图样上的标记示例

应用场合	图　例	说　明
表面粗糙度要求的注写方向	*Rz* 3.2　*Ra* 0.8　*Rz* 12.5　*Rz* 1.6	表面粗糙度的注写和读取方向与尺寸的注写和读取方向一致
表面粗糙度要求在轮廓线上或指引线上的标注	*Rz* 12.5　*Rz* 6.3　*Ra* 1.6　*Ra* 1.6　*Rz* 12.5　*Rz* 6.3 铣　*Rz* 3.2　车　*Rz* 3.2　*ϕ*28	表面粗糙度要求可标注在轮廓线上，其符号应从材料外指向并接触表面。必要时，表面粗糙度符号也可用带箭头或黑点的指引线引出标注
表面粗糙度要求在尺寸线上的标注	*ϕ*120H7　*Rz* 12.5 *ϕ*120h6　*Rz* 6.3	在不致引起误解时，表面粗糙度要求可以标注在给定的尺寸线上

（续）

应用场合	图　　例	说　　明
表面粗糙度要求在几何公差框格上的标注		表面粗糙度要求可标注在几何公差框格的上方
表面粗糙度要求在延长线上的标注	 图a 表面粗糙度要求标注在圆柱特征的延长线上  图b 圆柱和棱柱的表面粗糙度要求的注法	表面粗糙度要求可以直接标注在延长线上 圆柱和棱柱表面的表面粗糙度要求只标注一次（图 a） 如果每个棱柱表面有不同的表面粗糙度要求，则应分别单独标注（图 b）
大多数表面有相同表面粗糙度要求的简化注法		如果工件的多数（包括全部）表面有相同的表面粗糙度要求，则其表面粗糙度要求可统一标注在图样的标题栏附近。此时（除全部表面有相同要求的情况外），表面粗糙度要求的符号后面应有：在圆括号内给出无任何其他标注的基本符号
多个表面由共同表面粗糙度要求的标注	 图a 在图样空间有限时的简化注法  图b 未指定工艺方法的多个表面粗糙度要求的简化注法  图c 要求去除材料的多个表面粗糙度要求的简化注法  图c 不允许去除材料的多个表面粗糙度要求的简化注法	当多个表面具有相同的表面粗糙度要求或图样空间有限时，可以采用简化注法 1. 可用带字母的完整符号，以等式的形式，在图形或标题栏附近，对有相同表面粗糙度要求的表面进行简化标注（图 a） 2. 可用表面粗糙度基本图形符号和扩展图形符号，以等式的形式给出多个表面共同的表面粗糙度要求（图 b、c、d）

（续）

应用场合	图　例	说　明
两种或多种工艺获得的统一表面的注法	 同时给出镀覆前后的表面粗糙度要求的注法	有几种不同的工艺方法获得的同一表面，当需要明确每种工艺方法的表面结构要求时，可按照左图进行标注

四、各种加工方法能达到的表面粗糙度

各种加工方法能达到的表面粗糙度见表 F-6。

表 F-6　各种加工方法能达到的表面粗糙度

加工方法			表面粗糙度 Ra/μm
自动气割、带锯或圆盘锯割断			50～12.5
切断	车		50～12.5
	铣		25～12.5
	砂轮		3.2～1.6
车削外圆	粗车		12.5～3.2
	半精车	金属	6.3～3.2
		非金属	3.2～1.6
	精车	金属	3.2～0.8
		非金属	1.6～0.4
车削外圆	精密车（或金刚石车）	金属	0.8～0.2
		非金属	0.4～0.1
车削端面	粗车		12.5～6.3
	半精车	金属	6.3～3.2
		非金属	6.3～1.6
	精车	金属	6.3～1.6
		非金属	6.3～1.6
	精密车	金属	0.8～0.4
		非金属	0.8～0.2
切槽	一次行程		12.5
	二次行程		6.3～3.2
高速车削			0.8～0.2
钻	≤φ15mm		6.3～3.2
	>φ15mm		25～6.3

加工方法			表面粗糙度 Ra/μm
扩孔	粗（有表皮）		12.5～6.3
	粗		6.3～1.6
锪倒角（孔的）			3.2～1.6
带导向的锪平面			6.3～3.2
镗孔	粗镗		12.5～6.3
	半精镗	金属	6.3～3.2
		非金属	3.2～0.8
	精镗	金属	3.2～0.8
		非金属	1.6～0.4
	精密镗（或金刚石车）	金属	0.8～0.2
		非金属	0.4～0.2
高速镗			0.8～0.2
铰孔	半精铰（一次铰）	钢	6.3～3.2
		黄铜	6.3～1.6
	精铰（二次铰）	铸铁	3.2～0.8
		钢、轻合金	1.6～0.8
		黄铜、青铜	0.8～0.4
	精密铰	钢	0.8～0.2
		轻合金	0.8～0.4
		黄铜、青铜	0.2～0.1

附录 G

标准公差与偏差

一、标准公差等级代号与数值

标准公差等级代号用“IT”表示，国家标准公差等级为 20 级，各级标准公差代号为 IT01、IT0、IT1 ~ IT18，其中 IT01 公差等级最高，IT18 公差等级最低。并规定了各等级公差的数值，见表 G-1。

表 G-1　标准公差数值

公称尺寸/mm	公差等级																		
	μm													mm					
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
≤3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.10	0.14	0.25	0.40	0.60	1.0	1.4
>3 ~ 6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.2	1.8
>6 ~ 10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.5	2.2
>10 ~ 18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.70	1.10	1.8	2.7
>18 ~ 30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.30	2.1	3.3
>30 ~ 50	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1.00	1.60	2.5	3.9
>50 ~ 80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.30	0.46	0.74	1.20	1.90	3.0	4.6
>80 ~ 120	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.40	2.20	3.5	5.4
>120 ~ 180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.40	0.63	1.00	1.60	2.50	4.0	6.3
>180 ~ 250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.90	4.6	7.2
>250 ~ 315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.30	2.10	3.20	5.2	8.1
>315 ~ 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.40	2.30	3.60	5.7	8.9
>400 ~ 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.50	4.00	6.3	9.7
>500 ~ 630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.70	1.10	1.75	2.8	4.4	7.0	11.0

（续）

公称尺寸/mm	公差等级																		
	μm													mm					
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
>630～800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.80	1.25	2.00	3.2	5.0	8.0	12.5
>800～1000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.90	1.40	2.30	3.6	5.6	9.0	14.0
>1000～1250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	1.65	2.60	4.2	6.6	10.5	16.5
>1250～1600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.10	5.0	7.8	12.5	19.5
>1600～2000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.50	2.30	3.70	6.0	9.2	15.0	23.0
>2000～2500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1.75	2.80	4.40	7.0	11.0	17.5	28.0
>2500～3150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.10	3.30	5.40	8.6	13.5	21.0	33.0

注：1. 公称尺寸小于或等于1mm时，无IT14～IT18。

2. 公称尺寸大于500mm的IT1～IT15的标准公差数值为试行。

二、公差等级的选择

选择公差等级的基本原则是，在满足使用要求的条件下，选择低的公差等级。公差等级一般用类比法选择，也就是参照生产实践的经验，进行比较选择。表G-2为公差等级的主要应用，表G-3为各种加工方法可达到的公差等级。

表G-2　公差等级的主要应用

应用场合			公差等级（IT）																			
			01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
量块			—	—	—																	
量规	高精度量规				—	—	—	—														
量规	低精度量规								—	—	—											
配合尺寸	个别特别重要的精密配合			—	—																	
配合尺寸	特别重要的精密配合	孔					—	—	—													
配合尺寸	特别重要的精密配合	轴				—	—	—														
配合尺寸	精密配合	孔								—	—	—										
配合尺寸	精密配合	轴							—	—	—											
配合尺寸	中等精度配合	孔											—	—								
配合尺寸	中等精度配合	轴										—	—	—								
配合尺寸	低密度配合														—	—	—					
非配合尺寸、一般公差尺寸																—	—	—	—	—	—	—
原材料公差												—	—	—	—	—	—					

表 G-3　各种加工方法可达到的公差等级

加工方法	公差等级																		
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
研磨																				
珩磨																				
圆磨																				
平磨																				
金刚石车																				
金刚石镗																				
拉削																				
铰孔																				
精车精镗																				
粗车																				
粗镗																				
铣																				
刨插																				
钻削																				
冲压																				
滚压、挤压																				
锻造																				
砂型铸造																				
金属型铸造																				
气割																				

三、基本偏差

1. 基本偏差

在国家标准中，用以确定公差带相对于零线位置的上极限偏差或下极限偏差称为基本偏差，当公差带位于零线上方时，基本偏差为下极限偏差；公差带位于零线下方时，基本偏差为上极限偏差。基本偏差示意图如图 G-1 所示。

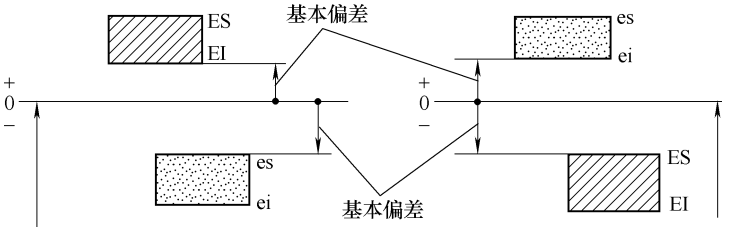


图 G-1　基本偏差示意图

国家标准规定基本偏差代号用拉丁字母（可按照英文字母读音）表示，为区别孔、

轴基本偏差，对孔用大写字母 A、B、…、ZC 表示，对轴用对应小写字母 a、b、…、zc 表示。孔和轴各有 28 个基本偏差代号，其中 JS 和 js 为完全对称偏差。

基本偏差是用以确定公差带相对零线位置的极限偏差。如图 G-2 所示，对所有公差带，基本偏差都是靠近零线的。由此，轴的基本偏差从 a 到 h 为上极限偏差 es，从 j 到 zc 为下极限偏差 ei；孔的基本偏差从 A 到 H 为下极限偏差 EI，从 J 到 ZC 为上极限偏差 ES。H 与 h 的基本偏差为零，故 H 代表基准孔，h 代表基准轴。

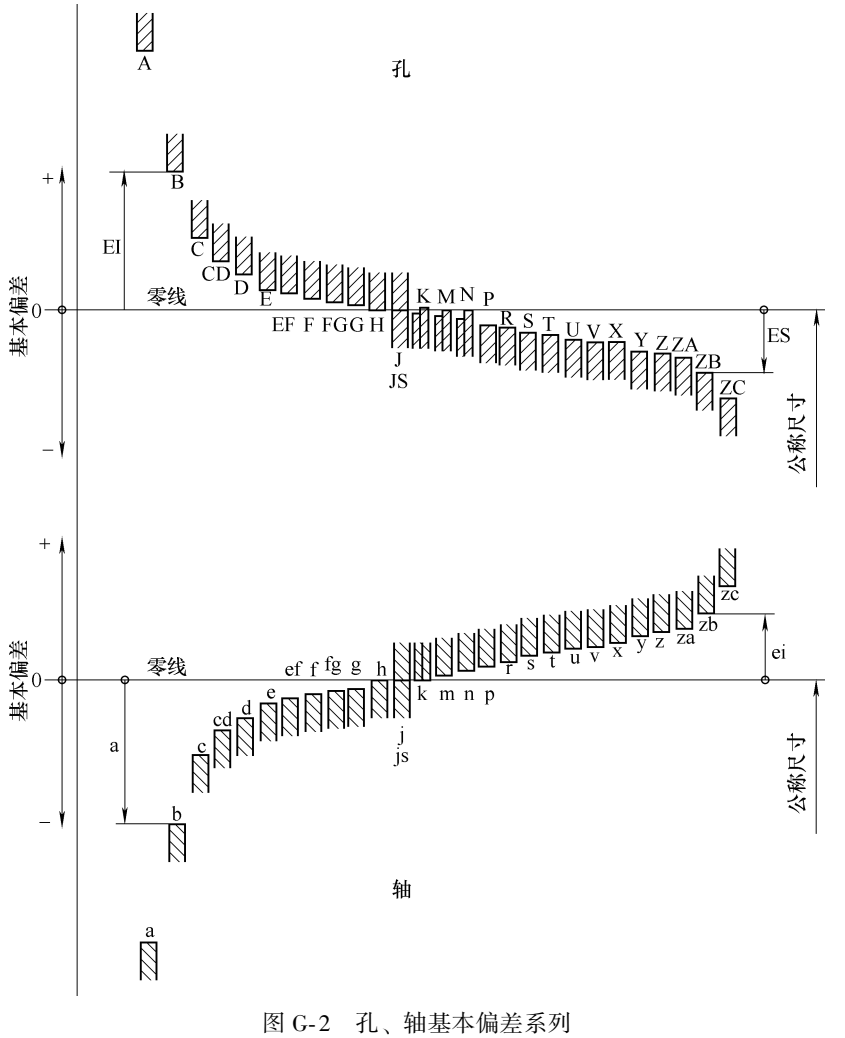


图 G-2　孔、轴基本偏差系列

2. 轴和孔的基本偏差数值

国家标准中又列出轴的基本偏差值和孔的基本偏差值，根据基本尺寸、基本偏差代号和公差等级查表便可得到基本偏差值。表 G-4 和表 G-5 列出了基本尺寸至 3150mm 轴和孔的基本偏差数值。孔的上极限偏差用 ES，下极限偏差用 EI 表示；轴的上极限偏差用 es，下极限偏差用表示 ei 表示。

表 G-4　轴的

基本偏差/μm

公称尺寸/mm	上极限偏差 es											js	j			k	
	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h						
	所有公差等级												5～6	7	8	4～7	≤3 >7
≤3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	偏差等于 $\pm\frac{IT_n}{2}$，式中 IT_n 是 IT 值数	-2	-4	-6	0	0
>3～6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	-0		-2	-4	—	+1	0
>6～10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0		-2	-5	—	+1	0
>10～14 >14～18	-290	-150	-95	—	-50	-32	—	-16	—	-6	0		-3	-6	—	+1	0
>18～24 >24～30	-300	-160	-110	—	-65	-40	—	-20	—	-7	0		-4	-8	—	+2	0
>30～40 >40～50	-310 -320	-170 -180	-120 -130	—	-80	-50	—	-25	—	-9	0		-5	-10	—	+2	0
>50～65 >65～80	-340 -360	-190 -200	-140 -150	—	-100	-60	—	-30	—	-10	0		-7	-12	—	+2	0
>80～100 >100～120	-380 -410	-220 -240	-170 -180	—	-120	-72	—	-36	—	-12	0		-9	-15	—	+3	0
>120～140 >140～160 >160～180	-460 -520 -580	-260 -280 -310	-200 -210 -230	—	-145	-85	—	-43	—	-14	0		-11	-18	—	+3	0
>180～200 >200～225 >225～250	-660 -740 -820	-340 -380 -420	-240 -260 -280	—	-170	-100	—	50	—	-15	0		-13	-21	—	+4	0
>250～280 >280～315	-920 -1050	-480 -540	-300 -330	—	-190	-110	—	56	—	-17	0		-16	-26	—	+4	0
>310～355 >355～400	-1200 -1350	-600 -680	-360 -400	—	-210	-125	—	-62	—	-18	0		-18	-28	—	+4	0
>400～450 >450～500	-1500 -1650	-760 -840	-440 -480	—	-230	-135	—	-68	—	-20	0		-20	-32	—	+5	0
>500～560 >560～630	—	—	—	—	-260	-145	—	-76	—	-22	0		—	—	—	0	0
>630～710 >710～800	—	—	—	—	-290	-160	—	-80	—	-24	0		—	—	—	0	0
>800～900 >900～1000	—	—	—	—	-320	-170	—	-86	—	-26	0		—	—	—	0	0
>1000～1120 >1120～1250	—	—	—	—	-350	-195	—	-98	—	-28	0		—	—	—	0	0
>1250～1400 >1400～1600	—	—	—	—	-390	-220	—	-110	—	-30	0		—	—	—	0	0
>1600～1800 >1800～2000	—	—	—	—	-430	-240	—	-120	—	-32	0		—	—	—	0	0
>2000～2240 >2240～2500	—	—	—	—	-480	-260	—	-130	—	-34	0		—	—	—	0	0
>2500～2800 >2800～3150	—	—	—	—	-520	-290	—	-145	—	-38	0		—	—	—	0	0

注：1. 公称尺寸小于1mm时，各级的a和b均不采用。

2. js的数值：对js7～js11，若 IT_n 值数为奇数，则取偏差 = ±（IT_n - 1）/2。

基本偏差数值

下极限偏差 ei													
m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
所有公差等级													
+2	+4	+6	+10	+14	—	+18	—	+20	—	+26	+32	+40	+60
+4	+8	+12	+15	+19	—	+23	—	+28	—	+35	+42	+50	+80
+6	+10	+15	+19	+23	—	+28	—	+34	—	+42	+52	+67	+97
+7	+12	+18	+23	+28	—	+33	— +39	+40 +45	—	+50 +60	+64 +77	+90 +108	+130 +150
+8	+15	+22	+28	+35	— +41	+41 +48	+47 +55	+54 +64	+63 +75	+73 +88	+98 +118	+136 +160	+188 +218
+9	+17	+26	+34	+43	+48 +54	+60 +70	+68 +81	+80 +97	+94 +114	+112 +136	+148 +180	+200 +242	+274 +325
+11	+20	+32	+41 +43	+53 +59	+66 +75	+87 +102	+102 +120	+122 +146	+144 +174	+172 +210	+226 +274	+300 +360	+405 +480
+13	+23	+37	+51 +54	+71 +79	+91 +104	+124 +144	+146 +172	+178 +210	+214 +254	+258 +310	+335 +400	+445 +525	+585 +690
+15	+27	+43	+63 +65 +68	+92 +100 +108	+122 +134 +146	+170 +190 +210	+202 +228 +252	+248 +280 +310	+300 +340 +380	+365 +415 +465	+470 +535 +600	+620 +700 +780	+800 +900 +1000
+17	+31	+50	+77 +80 +84	+122 +130 +140	+166 +180 +196	+236 +258 +284	+284 +310 +340	+350 +385 +425	+425 +470 +520	+520 +575 +640	+670 +740 +820	+880 +960 +1050	+1150 +1250 +1350
+20	+34	+56	+94 +98	+158 +170	+218 +240	+315 +350	+385 +425	+475 +525	+580 +650	+710 +790	+920 +1000	+1200 +1300	+1550 +1700
+21	+37	+62	+108 +114	+190 +208	+268 +294	+390 +435	+475 +530	+590 +660	+730 +820	+900 +1000	+1150 +1300	+1500 +1650	+1900 +2100
+23	+40	+68	+126 +132	+232 +252	+330 +360	+490 +540	+595 +660	+740 +820	+920 +1000	+1100 +1250	+1450 +1600	+1850 +2100	+2400 +2600
+26	+44	+78	+150 +155	+280 +310	+400 +450	+600 +660	—	—	—	—	—	—	—
+30	+50	+88	+175 +185	+340 +380	+500 +560	+740 +840	—	—	—	—	—	—	—
+34	+56	+100	+210 +220	+430 +470	+620 +680	+940 +1050	—	—	—	—	—	—	—
+40	+66	+120	+250 +260	+520 +580	+780 +840	+1150 +1300	—	—	—	—	—	—	—
+48	+78	+140	+300 +330	+640 +720	+960 +1050	+1450 +1600	—	—	—	—	—	—	—
+58	+92	+170	+370 +400	+820 +920	+1200 +1350	+1850 +2000	—	—	—	—	—	—	—
+68	+110	+195	+440 +460	+1000 +1100	+1500 +1650	+2300 +2500	—	—	—	—	—	—	—
+76	+135	+240	+550 +580	+1250 +1400	+1900 +2100	+2900 +3200	—	—	—	—	—	—	—

表 G-5　孔的基本偏差数值

（单位：μm）

公称尺寸/mm		基本偏差数值																				
		下极限偏差 EI												上极限偏差 ES								
大于	至	所有标准公差等级												IT6	IT7	IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT7
		A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS	J			K		M		N		P 至 ZC
—	3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	偏差 = $\pm\frac{IT_n}{2}$，式中 IT_n 是 IT 值数	+2	+4	+6	0	0	−2	−2	−4	−4	在大于 IT7 的相应数值上增加一个 Δ 值
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0		+5	+6	+10	−1+Δ		−4+Δ	−4	−8+Δ	0	
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	−1+Δ		−6+Δ	−6	−10+Δ	0	
10	14	+290	+150	+95		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	−1+Δ		−7+Δ	−7	−12+Δ	0	
14	18																						
18	24	+300	+160	+110		+65	+40		+20		+7	0		+8	+12	+20	−2+Δ		−8+Δ	−8	−15+Δ	0	
24	30																						
30	40	+310	+170	+120		+80	+50		+25		+9	0		+10	+14	+24	−2+Δ		−9+Δ	−9	−17+Δ	0	
40	50	+320	+180	+130																			
50	65	+340	+190	+140		+100	+60		+30		+10	0		+13	+18	+28	−2+Δ		−11+Δ	−11	−20+Δ	0	
65	80	+360	+200	+150																			
80	100	+380	+220	+170		+120	+72		+36		+12	0		+16	+22	+34	−3+Δ		−13+Δ	−13	−23+Δ	0	
100	120	+410	+240	+180																			
120	140	+460	+260	+200		+145	+85		+43		+14	0		+18	+26	+41	−3+Δ		−15+Δ	−15	−27+Δ	0	
140	160	+520	+280	+210																			
160	180	+580	+310	+230																			
180	200	+660	+340	+240		+170	+100		+50		+15	0		+22	+30	+47	−4+Δ		−17+Δ	−17	−31+Δ	0	
200	225	+740	+380	+260																			
225	250	+820	+420	+280																			
250	280	+920	+480	+300		+190	+110		+56		+17	0		+25	+36	+55	−4+Δ		−20+Δ	−20	−34+Δ	0	
280	315	+1050	+540	+330																			
315	355	+1200	+600	+360		+210	+125		+62		+18	0		+29	+39	+60	−4+Δ		−21+Δ	−21	−37+Δ	0	
355	400	+1350	+680	+400																			
400	450	+1500	+760	+440		+230	+135		+68		+20	0		+33	+43	+66	−5+Δ		−23+Δ	−23	−40+Δ	0	
450	500	+1650	+840	+480																			
500	560					+260	+145		+76		+22	0					0		−26		−44		
560	630																						
630	710					+290	+160		+80		+24	0					0		−30		−50		
710	800																						
800	900					+320	+170		+86		+26	0					0		−34		−56		
900	1000																						
1000	1120					+350	+195		+98		+28	0					0		−40		−66		
1120	1250																						
1250	1400					+390	+220		+110		+30	0					0		−48		−78		
1400	1600																						
1600	1800					+430	+240		+120		+32	0					0		−58		−92		
1800	2000																						
2000	2240					+480	+260		+130		+34	0					0		−68		−110		
2240	2500																						
2500	2800					+520	+290		+145		+38	0					0		−76		−135		
2800	3150																						

（续）

公称尺寸/mm		基本偏差数值												Δ值					
		上极限偏差 ES																	
大于	至	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级					
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
—	3	-6	-10	-14		-18		-20		-26	-32	-40	-60	0	0	0	0	0	0
3	6	-12	-15	-19		-23		-28		-35	-42	-50	-80	1	1.5	1	3	4	6
6	10	-15	-19	-23		-28		-34		-42	-52	-67	-97	1	1.5	2	3	6	7
10	14	-18	-23	-28		-33		-40		-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9
14	18						-39	-45		-60	-77	-108	-150						
18	24	-22	-28	-35		-41	-47	-54	-63	-73	-98	-136	-188	1.5	2	3	4	8	12
24	30				-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218						
30	40	-26	-34	-43	-48	-60	-68	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1.5	3	4	5	9	14
40	50				-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325						
50	65	-32	-41	-53	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	3	5	6	11	16
65	80		-43	-59	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480						
80	100	-37	-51	-71	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585	2	4	5	7	13	19
100	120		-54	-79	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690						
120	140	-43	-63	-92	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23
140	160		-65	-100	-134	-190	-228	-280	-340	-415	-535	-700	-900						
160	180		-68	-108	-146	-210	-252	-310	-380	-465	-600	-780	-1000						
180	200	-50	-77	-122	-166	-236	-284	-350	-425	-520	-670	-880	-1150	3	4	6	9	17	26
200	225		-80	-130	-180	-258	-310	-385	-470	-575	-740	-960	-1250						
225	250		-84	-140	-196	-284	-340	-425	-520	-640	-820	-1050	-1350						
250	280	-56	-94	-158	-218	-315	-385	-475	-580	-710	-920	-1200	-1550	4	4	7	9	20	29
280	315		-98	-170	-240	-350	-425	-525	-650	-790	-1000	-1300	-1700						

（续）

公称尺寸/mm		基本偏差数值												Δ值					
		上极限偏差 ES																	
大于	至	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级					
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
315	355	-62	-108	-190	-268	-390	-475	-590	-730	-900	-1150	-1500	-1900						
355	400		-114	-208	-294	-435	-530	-660	-820	-1000	-1300	-1650	-2100	4	5	7	11	21	32
400	450	-68	-126	-232	-330	-490	-595	-740	-920	-1100	-1450	-1850	-2400	5	5	7	13	23	34
450	500		-132	-252	-360	-540	-660	-820	-1000	-1250	-1600	-2100	-2600						
500	560	-78	-150	-280	-400	-600													
560	630		-155	-310	-450	-660													
630	710	-88	-175	-340	-500	-740													
710	800		-185	-380	-560	-840													
800	900	-100	-210	-430	-620	-940													
900	1000		-220	-470	-680	-1050													
1000	1120	-120	-250	-520	-780	-1150													
1120	1250		-260	-580	-840	-1300													
1250	1400	-140	-300	-640	-960	-1450													
1400	1600		-330	-720	-1050	-1600													
1600	1800	-170	-370	-820	-1200	-1850													
1800	2000		-400	-920	-1350	-2000													
2000	2240	-195	-440	-1000	-1500	-2300													
2240	2500		-460	-1100	-1650	-2500													
2500	2800	-240	-550	-1250	-1900	-2900													
2800	3150		-580	-1400	-2100	-3200													

注：1. 公称尺寸小于或等于1mm时，基本偏差A和B及大于IT8的N均不采用。公差带JS7至JS11，若IT_n值数是奇数，则取偏差 $= \pm\frac{IT_n-1}{2}$。

2. 对小于或等于IT8的K、M、N和小于或等于IT7的P至ZC，所需Δ值从表内右侧选取。例如：18～30mm段的K7，Δ=8μm，所以ES=-(2+8)μm=+6μm；18～30mm段的S6，Δ=4μm，所以ES=-(35+4)μm=-31μm。特殊情况：250～315mm段的M6，ES=-9μm（代替-11μm）。

3. 基准制

在各种配合中，公差带的位置固定不变的零件是配合的基准，称为基准孔或基准轴。

基孔制的配合是以孔的基本偏差为一定，不同的配合由改变轴的基本偏差得到。基准孔的基本偏差用 H 表示，其下极限偏差 EI = 0。

基轴制的配合是以轴的基本偏差为一定，不同的配合由改变孔的基本偏差得到。基准轴的基本偏差用 h 表示，其上极限偏差 es = 0。

在一般情况下，优先选用基孔制配合，同时允许采用任意孔、轴公差带组成的配合，例如 M7/g6。

轴或孔的基本偏差值（表 G-4 和表 G-5）确定后，另一偏差可以由基本偏差和标准偏差（IT）（表 G-1）求得。

例如：

（单位：μm）

举　例		基本偏差（IT）	标准公差	另一偏差	公差带
轴	ϕ20g8	上极限偏差 es：−7	+33	下极限偏差 ei：ei = es − IT = −40	$\phi20^{-7}_{-40}$
	ϕ20s8	下极限偏差 ei：+35	+33	上极限偏差 es：se = ei + IT = 68	$\phi20^{+68}_{+35}$
孔	ϕ20G8	上极限偏差 EI：+7	+33	上极限偏差 ES：ES = EI + IT = 40	$\phi20^{+40}_{+7}$
	ϕ20S8	上极限偏差 ES：−35	+33	下极限偏差 EI：EI = ES + IT = −68	$\phi20^{-35}_{-68}$

四、公差带与配合

1. 公差带的表示

公差带的表示用基本偏差代号（公差带位置）和标准公差等级代号（公差带大小）组成。例如：H8、f7。

1）公称尺寸后加所要求的公差带所对应的偏差值，例如：$100^{-0.036}_{-0.071}$。

2）公称尺寸后加所要求的公差带和对应的偏差值，例如：100f 7（$^{-0.036}_{-0.071}$）。

2. 配合的表示

配合用相同的公称尺寸后加孔、轴公差带表示。可写成分数形式，分子为孔公差带，分母为轴公差带。例如：50H8/f7 或 $50\frac{H8}{f7}$。

当使用有限字母组装置（如电报）传输信息时，公差带和配合的表示，需在尺寸前标注以下字母：

对孔为 H 或 h；对轴为 S 或 s。例如：

对公差带：50H5 为 H50H5 或 h50h5；h50 为 S50H5 或 s50h5。

对配合：52H7/g6 为 H52H7/S52G6 或 h52h7/s52g6。

但这种表示方法在图样上不能使用。

公差与配合示意图如图 G-3 所示。

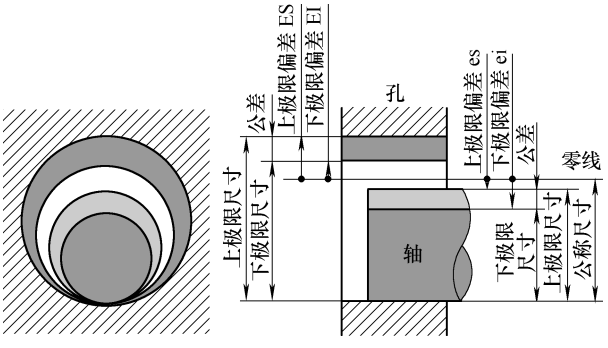


图 G-3　公差与配合示意图

3. 配合分类

根据孔、轴公差带相互关系，配合分为间隙配合、过渡配合和过盈配合。间隙配合用于孔、轴间的活动连接；过渡配合主要用于孔、轴之间的定位连接；过盈配合主要用于孔、轴之间的紧固连接，不允许两者有相对运动。

4. 常用和优先使用的公差带

常用和优先使用的公差带如图 G-4、图 G-5 所示，图中方框中的公差带为常用，圆圈中的公差带为优先使用的。选择配合时，应该尽量选用表 G-6、表 G-7 推荐的优选配合。

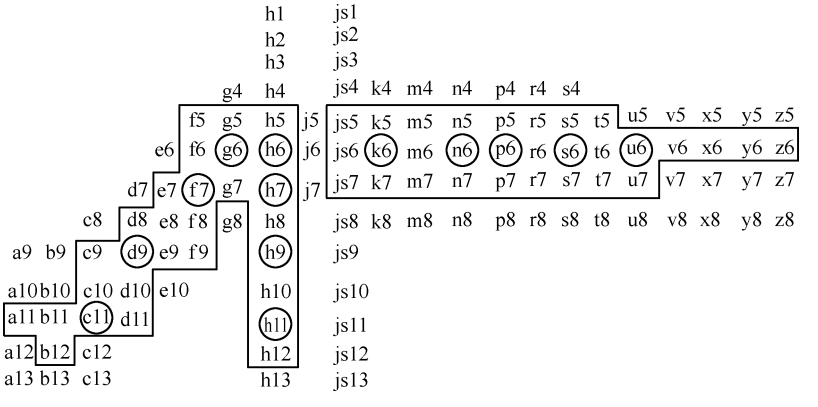


图 G-4　尺寸≤500mm 轴的一般、常用及优先公差带

注：1. 轴的一般公差带，共 116 个（包括常用和优先）。

2. 带方框的为常用公差带，共 59 个（包括优先）。

3. 带圆圈中的为优先公差带，共 13 个。

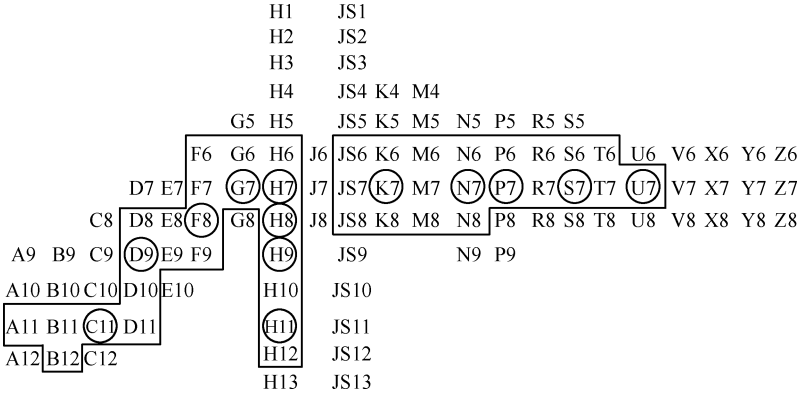


图 G-5　尺寸≤500mm 孔的一般、常用及优先公差带

注：1. 轴的一般公差带，共 105 个（包括常用和优先）。

2. 带方框的为常用公差带，共 44 个（包括优先）。

3. 带圆圈中的为优先公差带，共 13 个。

表 G-6　基孔制优先、常用配合

基准孔	轴																				
	a	b	c	d	e	f	g	h	js	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z
	间隙配合								过渡配合			过盈配合									
H6						H6/f5	H6/g5	H6/h5	H6/js5	H6/k5	H6/m5	H6/n5	H6/p5	H6/r5	H6/s5	H6/t5					
H7						H7/f6	H7/g6	H7/h6	H7/js6	H7/k6	H7/m6	H7/n6	H7/p6	H7/r6	H7/s6	H7/t6	H7/u6	H7/v6	H7/x6	H7/y6	H7/z6
H8					H8/e7	H8/f7	H8/g7	H8/h7	H8/js7	H8/k7	H8/m7	H8/n7	H8/p7	H8/r7	H8/s7	H8/t7	H8/u7				
				H8/d8	H8/e8	H8/f8		H8/h8													
H9			H8/c9	H9/d9	H9/e9	H9/f9		H9/h9													
H10			H10/c10	H10/d10				H10/h10													
H11	H11/a11	H11/b11	H11/c11	H11/d11				H11/h11													
H12		H12/b12						H12/h12													

注：1. H6/n5、H7/p6在公称尺寸小于或等于 3mm 和H8/r7在公称尺寸小于或等于 100mm 时，为过渡配合。

2. 标注◤符号的配合为优先配合。

表 G-7　基轴制优先、常用配合

基准轴	孔																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	JS	K	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z
	间隙配合								过渡配合			过盈配合									
h5						F6/h5	G6/h5	H6/h5	JS6/h5	K6/h5	M6/h5	N6/h5	P6/h5	R6/h5	S6/h5	T6/h5					
h6						F7/h6	G7/h6	H7/h6	JS7/h6	K7/h6	M7/h6	N7/h6	P7/h6	R7/h6	S7/h6	T7/h6	U7/h6				
h7					E8/h7	F8/h7		H8/h7	JS8/h7	K8/h7	M8/h7	N8/h7									
h8				D8/h8	E8/h8	F8/h8		H8/h8													
h9				D9/h9	E9/h9	F9/h9		H9/h9													
h10				D10/h10				H11/h10													
h11	A11/h11	B11/h11	C11/h11	D11/h11				H11/h11													
h12		B12/h12						H12/h12													

注：1. N6/h5、P7/h6 在公称尺寸小于或等于 3mm 时，为过渡配合。

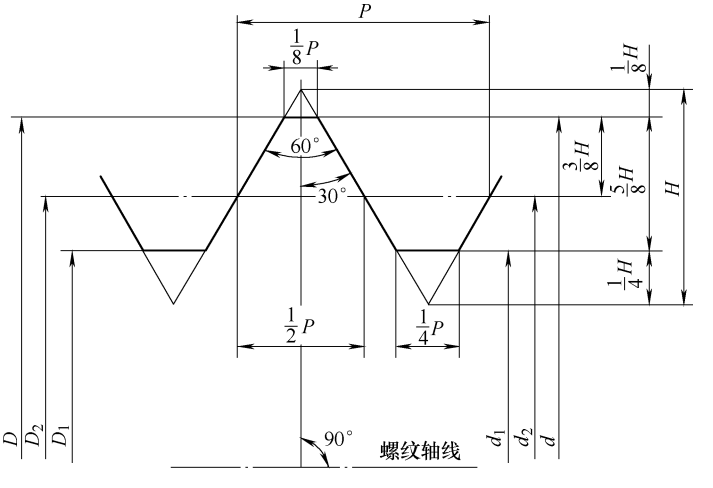
2. 标注◤符号的配合为优先配合。

附录 H
螺 纹 标 准

一、普通螺纹（M）

1. 普通螺纹牙型（GB/T 192—2003）

普通螺纹的基本牙型是截去原始三角形的顶部和底部形成的螺纹牙型，具有螺纹公称尺寸，如图 H-1 所示。



D— 内螺纹的基本大径（公称直径）；
d— 外螺纹的基本大径（公称直径）；
D_2— 内螺纹的基本中径；
d_2— 外螺纹的基本中径；
D_1— 内螺纹的基本小径；
d_1— 外螺纹的基本小径；
H— 原始三角形高度；
P— 螺距。

图 H-1　普通螺纹的基本牙型

普通螺纹的基本牙型尺寸按下列公式计算。

$$H=\frac{\sqrt{3}}{2}P=0.866\ 025\ 404P;$$

$$\frac{5}{8}H=0.541\ 265\ 877P;$$

$$\frac{3}{8}H=0.324\ 759\ 526P;$$

$$\frac{1}{4}H=0.216\ 506\ 351P;$$

$$\frac{1}{8}H=0.108\ 253\ 175P。$$

2. 普通螺纹直径与螺距系列

1）标准系列（GB/T 193—2003）。普通螺纹的直径与螺距系列见表 H-1。

表 H-1　普通螺纹的直径与螺距系列　　（单位：mm）

公称直径 D、d			螺　距　P	
第一系列	第二系列	第三系列	粗　牙	细　牙
1			0.25	0.2
	1.1		0.25	0.2
1.2			0.25	0.2
	1.4		0.3	0.2
1.6			0.35	0.2
	1.8		0.35	0.2
2			0.4	0.25
	2.2		0.45	0.25
2.5			0.45	0.35
3			0.5	0.35
	3.5		0.6	0.35
4			0.7	0.5
	4.5		0.75	0.5
5			0.8	0.5
		5.5		0.5
6			1	0.75
	7		1	0.75
8			1.25	1，0.75
		9	1.25	1，0.75

（续）

公称直径 D、d			螺　距　P	
第一系列	第二系列	第三系列	粗　牙	细　牙
10			1.5	1.25，1，0.75
		11	1.5	1，0.75
12			1.75	1.5，1.25，1
	14		2	1.5，1.25[①]，1
		15		1.5，1
16			2	1.5，1
		17		1.5，1
	18		2.5	2，1.5，1
20			2.5	2，1.5，1
	22		2.5	2，1.5，1
24			3	2，1.5，1
		25		2，1.5，1
		26		1.5
	27		3	2，1.5，1
		28		2，1.5，1
30			3.5	(3)，2，1.5，1
		32		2，1.5
	33		3.5	(3)，2，1.5
		35[②]		1.5
36			4	3，2，1.5
		38		1.5
	39		4	3，2，1.5
		40		3，2，1.5
42			4.5	4，3，2，1.5
	45		4.5	4，3，2，1.5
48			5	4，3，2，1.5
		50		3，2，1.5
	52		5	4，3，2，1.5
		55		4，3，2，1.5
56			5.5	4，3，2，1.5
		58		4，3，2，1.5
	60		5.5	4，3，2，1.5
		62		4，3，2，1.5
64			6	4，3，2，1.5

（续）

公称直径 D、d			螺　距　P	
第一系列	第二系列	第三系列	粗　牙	细　牙
		65		4，3，2，1.5
	68		6	4，3，2，1.5
		70		6，4，3，2，1.5
72				6，4，3，2，1.5
		75		4，3，2，1.5
	76			6，4，3，2，1.5
		78		2
80				6，4，3，2，1.5
		82		2
	85			6，4，3，2
90				6，4，3，2
	95			6，4，3，2
100				6，4，3，2
	105			6，4，3，2
110				6，4，3，2
	115			6，4，3，2
	120			6，4，3，2
125				8，6，4，3，2
	130			8，6，4，3，2
		135		6，4，3，2
140				8，6，4，3，2
		145		6，4，3，2
	150			8，6，4，3，2
		155		6，4，3，2
160				8，6，4，3
		165		6，4，3
	170			8，6，4，3
		175		6，4，3
180				8，6，4，3
		185		6，4，3
	190			8，6，4，3
		195		6，4，3
200				8，6，4，3

（续）

公称直径 D、d			螺　距　P	
第一系列	第二系列	第三系列	粗　牙	细　牙
		205		6，4，3
	210			8，6，4，3
		215		6，4，3
220				8，6，4，3
		225		6，4，3
		230		8，6，4，3
		235		6，4，3
	240			8，6，4，3
		245		6，4，3
250				8，6，4，3
		255		6，4
	260			8，6，4
		265		6，4
		270		8，6，4
		275		6，4
280				8，6，4
		285		6，4
		290		8，6，4
		295		6，4
	300			8，6，4

注：1. 优先选用第一系列直径，其次选用第二系列直径，最后再选用第三系列直径。

2. 尽可能地避免选用括号内的螺距。

① 仅用于发动机的火花塞。

② 仅用于轴承的锁紧螺母。

2）特殊系列（GB/T 193—2003）。如果需要使用比表 H-1 还要小的特殊螺距，则应从下列螺距中选择：

3mm、2mm、1.5mm、1mm、0.75mm、0.5mm、0.35mm、0.25mm 和 0.2mm。

选用的最大特殊直径不宜超出表 H-2 所限定的直径范围。

表 H-2　最大公称直径　　（单位：mm）

螺　距	最大公称直径	螺　距	最大公称直径
0.5	22	1.5	150
0.75	33	2	200
1	80	3	300

3）优选系列（GB/T 9144—2003）。普通螺纹的优选系列见表 H-3。

表 H-3　普通螺纹的优选系列　　（单位：mm）

公称直径 D、d		螺 距 P		公称直径 D、d		螺 距 P	
第一系列	第二系列	粗牙	细牙	第一系列	第二系列	粗牙	细牙
1		0.25			18	2.5	2，1.5
1.2		0.25		20		2.5	2，1.5
	1.4	0.3			22	2.5	2，1.5
1.6		0.35		24		3	2
	1.8	0.35			27	3	2
2		0.4		30		3.5	2
2.5		0.45			33	3.5	2
3		0.5		36		4	3
	3.5	0.6			39	4	3
4		0.7		42		4.5	3
5		0.8			45	4.5	3
6		1		48		5	3
	7	1					
8		1.25	1		52	5	4
10		1.5	1.25，1	56		5.5	4
12		1.75	1.5，1.25		60	5.5	4
	14	2	1.5	64		6	4
16		2	1.5				

4）管路系列（GB/T 1414—20B）。普通螺纹的管路系列表 H-4。

表 H-4　普通螺纹的管路系列　　（单位：mm）

公称直径 D、d		螺距 P	公称直径 D、d		螺距 P
第一系列	第二系列		第一系列	第二系列	
8		1.25，1		52	1.5
10		1.25，1		60	3，2
12		1	64		1.5
	14	2，1.5	72		3
16		1.5，1		76	3
	18	2，1.5	80		1.5
20		1.5		85	2
	22	1.5	90		4
24		2	100		3
	27	2		115	4
30		2，1.5	125		2
	33	2	140		3
36		1.5		150	2
	39	3	160		2
42		3，2		170	4
48		3，2			

3. 常用普通螺纹钻底孔尺寸

普通螺纹钻底孔尺寸见表 H-5。

表 H-5　普通螺纹钻底孔尺寸　　（单位：mm）

公称直径	粗牙				细牙															
		钻孔直径				钻孔直径				钻孔直径				钻孔直径						
	螺距	铸黄铁铜	钢黄料铜	镗孔直径	螺距	铸黄铁铜	钢黄料铜	镗孔直径	螺距	铸黄铁铜	钢黄料铜	镗孔直径	螺距	铸黄铁铜	钢黄料铜	镗孔直径	螺距	镗孔直径	螺距	镗孔直径
d	t	ϕ	ϕ	ϕ	t	ϕ	ϕ	ϕ	t	ϕ	ϕ	ϕ	t	ϕ	ϕ	ϕ	t	ϕ	t	ϕ
3	0.5	2.5	2.6	—	0.35	2.6	2.7	—												
4	0.7	3.3	3.3	—	0.5	3.5	3.5	—												
5	0.8	4.1	4.2	—		4.5	4.5	—												
6	1	4.9	5.1	—	0.75	5.3	5.3	—												
8	1.25	6.6	6.8	—		7.4	7.5	—	1	7.1	7.2	—								
10	1.5	8.3	8.5	—		9.1	9.2	—	1.25	8.8	8.9	—								
12	1.75	10	10.2	—		11.1	11.2	—		10.6	10.8	—	1.5	10.5	10.5	—				
14	2	11.7	12	—		13.1	13.2	—		12.3	12.5	—		—	—	—				
16	2	13.7	14	—		15.1	15.2	—		14.3	14.5	—		—	—	—				
18	2.5	15.1	15.5	—	1	17.1	17	—		16.3	16.5	—		16	16.4	—				
20	2.5	17.1	17.5	—		19.1	19.2	—	1.5	18.3	18.5	—		18	18.4	—				
22	2.5	19.1	19.5	—		21.1	21.2	—		20.3	20.5	—		20	20.4	—				
24	3	20.6	21	—		23.1	23.1	—		22.3	22.5	—	2	22	22	—				
27	3	23.6	24	—		26.1	26.1	—		25.3	25.5	—		24.7	25	—				
30	3.5	26	26.4	—		29.1	29.1	—		28.3	28.5	—		27.7	28	—				
33	3.5	29	29.6	29.4		32	32	31.4	—	31.3	31.5	—		30.7	31	—				
35	4	—	—	—		34.4	33.5	33.4	—	—	33.5	—		—	—	—				
36	4	31.4	32	31.8		34.4	34.5	34.5		33.7	34	33.9		32.6	33	32.8				
39	4	34.4	35	34.8		37.3	37.5	37.5		36.7	37	36.9		35.6	36	35.8				
40	—	—	—	—		—	38.5	38.5		—	—	—			—	—				
42	4.5	36.8	37.5	37.3		40.3	40.5	40.5		39.7	40	39.9		38.6	39	38.8			6	
45	4.5	39.8	40.5	40.3		43.3	43.5	43.5		42.7	43	42.9		41.6	42	41.8				
48	5	42.2	43	42.7		46.3	46.5	46.5		45.7	46	45.9		44.6	45	44.8				
50	5	—	—	—		48.3	48.5	48.5		—	—	—			—	—				
52	5	—	47	46.7		—	—	50.5		—	—	49.9			49	48.8				
55	5	—	—	—		—	—	—		—	—	52.9				—				
56	5.5	—	—	50.3		—	—	54.5		—	—	53.9				51.8		51.8		
60	6	—	—	54.3		—	—	58.5		—	—	57.9				55.8		55.8		
64	6	—	—	57.7		—	—	62.5	2	—	—	61.9				59.8		59.8		
65	—	—	—	—	1.5	—	—	—		—	—	62.9	3			—		—		
68	6	—	—	61.7		—	—	66.5		—	—	65.9				63.8		63.8		
72	—	—	—	—		—	—	70.5		—	—	70				69		67.8		65.6
75	—	—	—	—		—	—	—		—	—	73				—	4	—		—
76	—	—	—	—		—	—	74.5		—	—	74				73		71.8		69.6
80	—	—	—	—		—	—	78.5		—	—	78				77		75.8		73.6
85	—	—	—	—		—	—	83.5		—	—	83				82		80.8		78.6
90	—	—	—	—		—	—	88.5		—	—	88				87		85.8		83.6
95	—	—	—	—		—	—	93.5		—	—	93				92		90.8		88.6
100	—	—	—	—		—	—	98.5		—	—	98				97		95.8		93.6
105	—	—	—	—		—	—	104		—	—	103				102		100.8		98.6
110	—	—	—	—		—	—	109		—	—	108				107		105.8		103.6

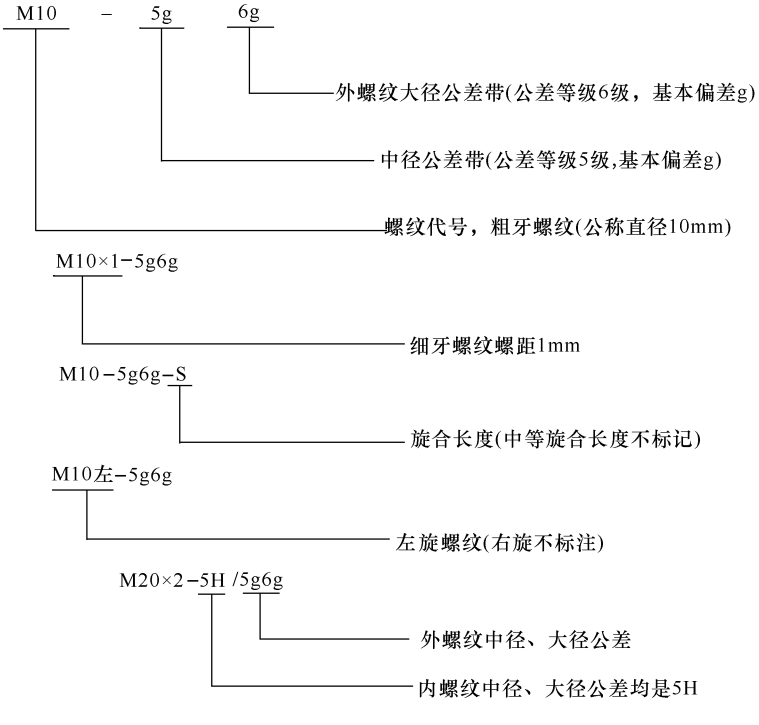
（续）

公称直径 d	粗牙				细牙															
	螺距 t	钻孔直径		镗孔直径 ϕ	螺距 t	钻孔直径		镗孔直径 ϕ	螺距 t	钻孔直径		镗孔直径 ϕ	螺距 t	钻孔直径		镗孔直径 ϕ	螺距 t	镗孔直径 ϕ	螺距 t	镗孔直径 ϕ
		铸黄铁铜 ϕ	钢黄料铜 ϕ			铸黄铁铜 ϕ	钢黄料铜 ϕ			铸黄铁铜 ϕ	钢黄料铜 ϕ			铸黄铁铜 ϕ	钢黄料铜 ϕ					
115	—	—	—	—	1.5	—	—	114	2	—	—	113	3			112	4	110.8	6	109
120	—	—	—	—		—	—	119		—	—	118				117		115.8		114
125	—	—	—	—		—	—	124		—	—	123				122		120.8		119
130	—	—	—	—		—	—	129		—	—	128				127		125.8		124
135	—	—	—	—		—	—	134		—	—	133				132		130.8		129
140	—	—	—	—		—	—	139		—	—	138				137		135.8		134
145	—	—	—	—		—	—	144		—	—	143				142		140.8		139
150	—	—	—	—		—	—	—		—	—	148				147		145.8		144

4. 普通螺纹代号与标记

普通螺纹分为粗牙和细牙两种：粗牙普通螺纹用字母“M”及“公称直径”表示，如 M8；细牙普通螺纹用字母“M”及“公称直径×螺距”表示，如 M20×1.5；当螺纹为左旋时，在螺纹代号之后加“左”字，如“M16 左”。

螺纹标记方法举例：



5. 普通螺纹公差（GB/T 197—2003）

1）普通螺纹的公差带。螺纹公差带是由公差带的位置和公差带的大小组成。公差带的位置是指的起始点到基本牙型的距离，并称为基本偏差。国家标准规定外螺纹的上极限偏差（es）和内螺纹的下极限偏差（EI）为基本偏差。

对内螺纹规定 G、H 两种位置如图 H-2 所示，对外螺纹规定 e、f、g、h 四种位置如图 H-3 所示。H、h 的基本偏差为零，G 的基本偏差为正值，e、f、g 的基本偏差为负值。

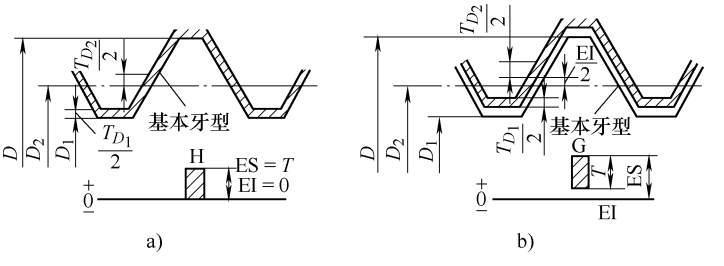


图 H-2　内螺纹公差带位置

a）公差带位置为 G　b）公差带位置为 H

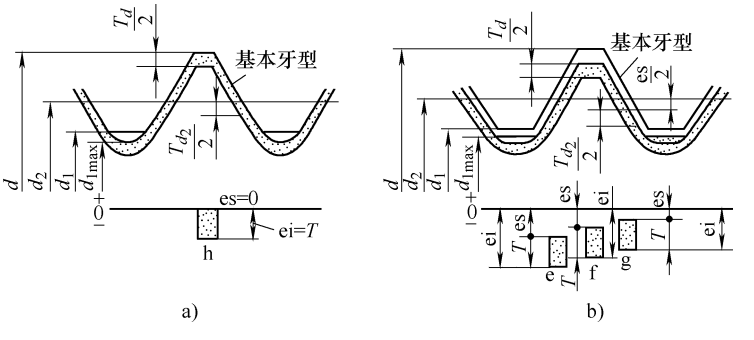


图 H-3　外螺纹公差带位置

a）公差带位置为 e、f 和 g　b）公差带位置为 h

2）内、外螺纹的基本偏差值。内、外螺纹的基本偏差值见表 H-6。

表 H-6　内、外螺纹的基本偏差　　（单位：μm）

螺距 P/mm	基本偏差					
	内螺纹 D_2、D_1		外螺纹 d_1、d_2			
	G (EI)	H (EI)	e (es)	f (es)	g (es)	h (es)
0.2	+17	0	—	—	-17	0
0.25	+18	0	—	—	-18	0

（续）

螺距 P/mm	基本偏差					
	内螺纹 D_2、D_1		外螺纹 d_1、d_2			
	G (EI)	H (EI)	e (es)	f (es)	g (es)	h (es)
0.3	+18	0	—	—	-18	0
0.35	+19	0	—	-34	-19	0
0.4	+19	0	—	-34	-19	0
0.45	+20	0	—	-35	-20	0
0.5	+20	0	-50	-36	-20	0
0.6	+21	0	-53	-36	-21	0
0.7	+22	0	-56	-38	-22	0
0.75	+22	0	-56	-38	-22	0
0.8	+24	0	-60	-38	-24	0
1	+26	0	-60	-40	-26	0
1.25	+28	0	-63	-42	-28	0
1.5	+32	0	-67	-45	-32	0
1.75	+34	0	-71	-48	-34	0
2	+38	0	-71	-52	-38	0
2.5	+42	0	-80	-58	-42	0
3	+48	0	-85	-63	-48	0
3.5	+53	0	-90	-70	-53	0
4	+60	0	-95	-75	-60	0
4.5	+63	0	-100	-80	-63	0
5	+71	0	-106	-85	-71	0
5.5	+75	0	-112	-90	-75	0
6	+80	0	-118	-95	-80	0
8	+100	0	-140	-118	-100	0

3）普通螺纹的公差等级。公差带的大小由公差值 T 决定，将 T 划分为若干等级称为公差等级，以代表公差带的大小。

国家标准中对内、外螺纹的中径和顶径规定的公差等级见表 H-7。

表 H-7　普通螺纹的公差等级

直径	公差等级	备　注	直径	公差等级	备　注
D_1 D_2	4，5，6，7，8 4，5，6，7，8	内螺纹大径的最大值依刃具牙顶的削平高度而定	d d_2	4，6，8 3，4，5，6，7，8，9	外螺纹小径的最小值依刃具牙顶的削平高度而定

4）普通螺纹的顶径公差值（见表 H-8、表 H-9）

表 H-8　内螺纹小径公差（T_{D_1}）　　（单位：μm）

螺距 P/mm	公差等级				
	4	5	6	7	8
0.2	38	—	—	—	—
0.25	45	56	—	—	—
0.3	53	67	85	—	—
0.35	63	80	100	—	—
0.4	71	90	112	—	—
0.45	80	100	125	—	—
0.5	90	112	140	180	—
0.6	100	125	160	200	—
0.7	112	140	180	224	—
0.75	118	150	190	236	—
0.8	125	160	200	250	315
1	150	190	236	300	375
1.25	170	212	265	335	425
1.5	190	236	300	375	475
1.75	212	265	335	425	530
2	236	300	375	475	600
2.5	280	355	450	560	710
3	315	400	500	630	800
3.5	355	450	560	710	900
4	375	475	600	750	950
4.5	425	530	670	850	1060
5	450	560	710	900	1120
5.5	475	600	750	950	1180
6	500	630	800	1000	1250
8	630	800	1000	1250	1600

表 H-9　外螺纹大径公差（T_d）　　（单位：μm）

螺距 P/mm	公差等级			螺距 P/mm	公差等级		
	4	6	8		4	6	8
0.2	36	56	—	1.25	132	212	335
0.25	42	67	—	1.5	150	236	375
0.3	48	75	—	1.75	170	265	425
0.35	53	85	—	2	180	280	450
0.4	60	95	—	2.5	212	335	530
0.45	63	100	—	3	236	375	600
0.5	67	106	—	3.5	265	425	670
0.6	80	125	—	4	300	475	750
0.7	90	140	—	4.5	315	500	800
0.75	90	140	—	5	335	530	850
0.8	95	150	236	5.5	355	560	900
1	112	180	280	6	375	600	950
				8	450	710	1180

5）普通螺纹的中径公差值（见表 H-10、表 H-11）

表 H-10　内螺纹中径公差（T_{D_2}）　　（单位：μm）

公称直径 D/mm		螺距 P/mm	公差等级				
>	≤		4	5	6	7	8
0.99	1.4	0.2	40	—	—	—	—
		0.25	45	56	—	—	—
		0.3	48	60	75	—	—
1.4	2.8	0.2	42	—	—	—	—
		0.25	48	60	—	—	—
		0.35	53	67	85	—	—
		0.4	56	71	90	—	—
		0.45	60	75	95	—	—
2.8	5.6	0.35	56	71	90	—	—
		0.5	63	80	100	125	—
		0.6	71	90	112	140	—
		0.7	75	95	118	150	—
		0.75	75	95	118	150	—
		0.8	80	100	125	160	200
5.6	11.2	0.75	85	106	132	170	—
		1	95	118	150	190	236
		1.25	100	125	160	200	250
		1.5	112	140	180	224	280
11.2	22.4	1	100	125	160	200	250
		1.25	112	140	180	224	280
		1.5	118	150	190	236	300
		1.75	125	160	200	250	315
		2	132	170	212	265	335
		2.5	140	180	224	280	355
22.4	45	1	106	132	170	212	—
		1.5	125	160	200	250	315
		2	140	180	224	280	355
		3	170	212	265	335	425
		3.5	180	224	280	355	450
		4	190	236	300	375	475
		4.5	200	250	315	400	500
45	90	1.5	132	170	212	265	335
		2	150	190	236	300	375
		3	180	224	280	355	450
		4	200	250	315	400	500
		5	212	265	335	425	530

（续）

公称直径 D/mm		螺距 P/mm	公差等级				
>	≤		4	5	6	7	8
45	90	5.5	224	280	355	450	560
		6	236	300	375	475	600
90	180	2	160	200	250	315	400
		3	190	236	300	375	475
		4	212	265	335	425	530
		6	250	315	400	500	630
		8	280	355	450	560	710
180	355	3	212	265	335	425	530
		4	236	300	375	475	600
		6	265	335	425	530	670
		8	300	375	475	600	750

表 H-11　外螺纹中径公差（T_{d_2}）　　（单位：μm）

公称直径 D/mm		螺距 P /mm	公差等级						
>	≤		3	4	5	6	7	8	9
0.99	1.4	0.2	24	30	38	48	—	—	—
		0.25	26	34	42	53	—	—	—
		0.3	28	36	45	56	—	—	—
1.4	2.8	0.2	25	32	40	50	—	—	—
		0.25	28	36	45	56	—	—	—
		0.35	32	40	50	63	80	—	—
		0.4	34	42	53	67	85	—	—
		0.45	36	45	56	71	90	—	—
2.8	5.6	0.35	34	42	53	67	85	—	—
		0.5	38	48	60	75	95	—	—
		0.6	42	53	67	85	106	—	—
		0.7	45	56	71	90	112	—	—
		0.75	45	56	71	90	112	—	—
		0.8	48	60	75	95	118	150	190
5.6	11.2	0.75	50	63	80	100	125	—	—
		1	56	71	90	112	140	180	224
		1.25	60	75	95	118	150	190	236
		1.5	67	85	106	132	170	212	265
11.2	22.4	1	60	75	95	118	150	190	236
		1.25	67	85	106	132	170	212	265
		1.5	71	90	112	140	180	224	280
		1.75	75	95	118	150	190	236	300
		2	80	100	125	160	200	250	315
		2.5	85	106	132	170	212	265	335

（续）

公称直径 D/mm		螺距 P	公差等级						
>	≤	/mm	3	4	5	6	7	8	9
22.4	45	1	63	80	100	125	160	200	250
		1.5	75	95	118	150	190	236	300
		2	85	106	132	170	212	265	335
		3	100	125	160	200	250	315	400
		3.5	106	132	170	212	265	335	425
		4	112	140	180	224	280	355	450
		4.5	118	150	190	236	300	375	475
45	90	1.5	80	100	125	160	200	250	315
		2	90	112	140	180	224	280	355
		3	106	132	170	212	265	335	425
		4	118	150	190	236	300	375	475
		5	125	160	200	250	315	400	500
		5.5	132	170	212	265	335	425	530
		6	140	180	224	280	355	450	560
90	180	2	95	118	150	190	236	300	375
		3	112	140	180	224	280	355	450
		4	125	160	200	250	315	400	500
		6	150	190	236	300	375	475	600
		8	170	212	265	335	425	530	670
180	355	3	125	160	200	250	315	400	500
		4	140	180	224	280	355	450	560
		6	160	200	250	315	400	500	630
		8	180	224	280	355	450	560	710

6）螺纹旋合长度。普通螺纹的旋合长度分为短（S）、中等（N）和长（L）三组。螺纹旋合长度见表 H-12。

表 H-12　普通螺纹的旋合长度　　（单位：mm）

基本大径 D、d		螺距 P	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
0.99	1.4	0.2	0.5	0.5	1.4	1.4
		0.25	0.6	0.6	1.7	1.7
		0.3	0.7	0.7	2	2
1.4	2.8	0.2	0.5	0.5	1.5	1.5
		0.25	0.6	0.6	1.9	1.9
		0.35	0.8	0.8	2.6	2.6
		0.4	1	1	3	3
		0.45	1.3	1.3	3.8	3.8

（续）

基本大径 D、d		螺距 P	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
2.8	5.6	0.35	1	1	3	3
		0.5	1.5	1.5	4.5	4.5
		0.6	1.7	1.7	5	5
		0.7	2	2	6	6
		0.75	2.2	2.2	6.7	6.7
		0.8	2.5	2.5	7.5	7.5
5.6	11.2	0.75	2.4	2.4	7.1	7.1
		1	3	3	9	9
		1.25	4	4	12	12
		1.5	5	5	15	15
11.2	22.4	1	3.8	3.8	11	11
		1.25	4.5	4.5	13	13
		1.5	5.6	5.6	16	16
		1.75	6	6	18	18
		2	8	8	24	24
		2.5	10	10	30	30
22.4	45	1	4	4	12	12
		1.5	6.3	6.3	19	19
		2	8.5	8.5	25	25
		3	12	12	36	36
		3.5	15	15	45	45
		4	18	18	53	53
		4.5	21	21	63	63
45	90	1.5	7.5	7.5	22	22
		2	9.5	9.5	28	28
		3	15	15	45	45
		4	19	19	56	56
		5	24	24	71	71
		5.5	28	28	85	85
		6	32	32	95	95
90	180	2	12	12	36	36
		3	18	18	53	53
		4	24	24	71	71
		6	36	36	106	106
		8	45	45	132	132
180	355	3	20	20	60	60
		4	26	26	80	80
		6	40	40	118	118
		8	50	50	150	150

7）螺纹公差带的选用。螺纹配合精度分精密、中等、粗糙三类。内、外螺纹的推荐公差带见表 H-13。

表 H-13　内、外螺纹的推荐公差带

	精度	公差带位置 G			公差带位置 H		
		S	N	L	S	N	L
内螺纹	精密	—	—	—	4H	5H	6H
	中等	(5G)	6G	(7G)	5H	*6H	7H
	粗糙	—	(7G)	(8G)	—	7H	8H

	精度	公差带位置 e			公差带位置 f			公差带位置 g			公差带位置 h		
		S	N	L	S	N	L	S	N	L	S	N	L
外螺纹	精密	—	—	—	—	—	—	—	4g	(5g4g)	(3h4h)	4h	(5h4h)
	中等	—	6e	(7e6e)	—	6f	—	(5g6g)	*6g	(7g6g)	(5h6h)	6h	(7h6h)
	粗糙	—	(8e)	(9e8e)	—	—	—	—	8g	(9g8g)	—	—	—

注：1. 大量生产的螺纹紧固件采用带 * 的粗字体公差带。

2. 优先选用粗字体的公差带，其次选择一般字体的公差带，括号内的公差带尽量不用。

3. 如无特殊说明，推荐公差带适用于涂镀前螺纹。涂镀后，螺纹实际轮廓上任何点的螺纹不应超越按公差位置 H 或 h 所确定的最大实体牙型。

8）普通螺纹的极限偏差。内、外螺纹各个公差带的基本偏差和公差的计算公式为：

内螺纹中径的下极限偏差（基本偏差）为 EI。

内螺纹中径的上极限偏差为 $ES = EI + T_{D_2}$。

内螺纹小径的下极限偏差为 EI。

内螺纹小径的上极限偏差为 $ES = EI + T_{D_1}$。

外螺纹中径的上极限偏差（基本偏差）为 es。

外螺纹中径的下极限偏差为 $ei = es - T_{d_2}$。

外螺纹大径的上极限偏差为 es。

外螺纹大径的下极限偏差为 $ei = es - T_d$。

二、梯形螺纹（30°）（Tr）

1. 梯形螺纹牙型（GB/T 5796.1—2005）

标准规定了两种梯形螺纹牙型，即基本牙型和最大实体牙型。

1）基本牙型。基本牙型即理论牙型，是由顶部为 30°的原始等腰三角形，截去顶部和底部所形成的内、外螺纹共有的牙型，如图 H-4 所示。

2）最大实体牙型。最大实体牙型即设计牙型，设计牙型与基本牙型的不同点为大径和小径间都留有一定间隙，牙顶、牙底给出了制造所需的圆弧。设计牙型及公称尺寸代号，如图 H-5 所示。

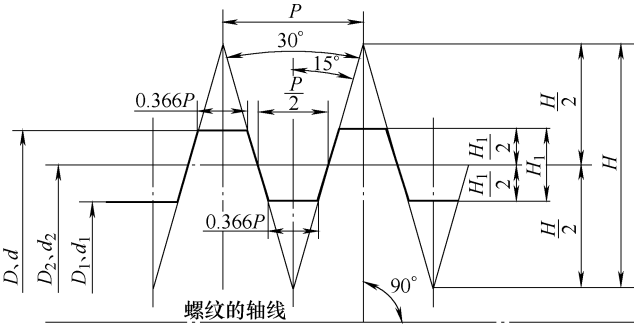
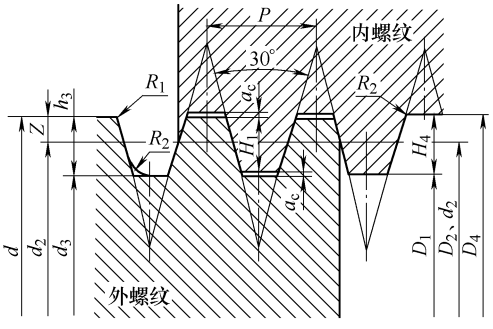


图 H-4　梯形螺纹基本牙型

D—内螺纹大径　d—外螺纹大径　D_1—内螺纹小径　d_1—外螺纹小径

D_2—内螺纹中径　d_2—外螺纹中径　H—原始三角形高度

P—螺距　H_1—基本牙型高度



名称	代号及关系式	名称	代号及关系式
外螺纹大径	d	外螺纹中径	$d_2 = d - 2Z = d - 0.5P$
螺距	P	内螺纹中径	$D_2 = d - 2Z = d - 0.5P$
牙顶间隙	a_c	外螺纹小径	$d_3 = d - 2h_3$
基本牙型高度	$H_1 = 0.5P$	内螺纹小径	$D_1 = d - 2H_1 = d - P$
外螺纹牙高	$h_3 = H_1 + a_c = 0.5P + a_c$	内螺纹大径	$D_4 = d + 2a_c$
内螺纹牙高	$H_4 = H_1 + a_c = 0.5P + a_c$	外螺纹牙顶圆角	$R_{1max} = 0.5a_c$
牙顶高	$Z = 0.25P = H_1/2$	牙底圆角	$R_{2max} = a_c$

图 H-5　梯形螺纹设计牙型

2. 梯形螺纹的特点和应用

1）特点：梯形螺纹是螺纹的一种，牙型为等腰梯形，牙型角为 30°。内、外螺纹以锥面贴紧不易松动。与矩形螺纹相比，梯形螺纹传动效率略低，但工艺性好，牙根强度高，对中性好。如用剖分螺母，还可以调整间隙。

2）应用：梯形螺纹是最常用的传动螺纹。

3. 梯形螺纹的表示（GB/T 5796. 1—2005）

国家标准规定 30°梯形螺纹代号用“Tr”表示。单线螺纹用“公称直径 × 螺距”表示，多线螺纹用“公称直径 × 导程（P 螺距）”表示。左旋螺纹需在尺寸规格之后加

注“LH”，右旋则不注出。例如 Tr36×6，Tr44×8LH 等。

三、锯齿形螺纹（3°、30°）

1. 锯齿形（3°、30°）螺纹牙型（GB/T 13576.1—1992）

标准规定锯齿形（3°、30°）螺纹牙型有两种：基本牙型和设计牙型。

1）基本牙型。基本牙型即理论牙型，如图 H-6 所示

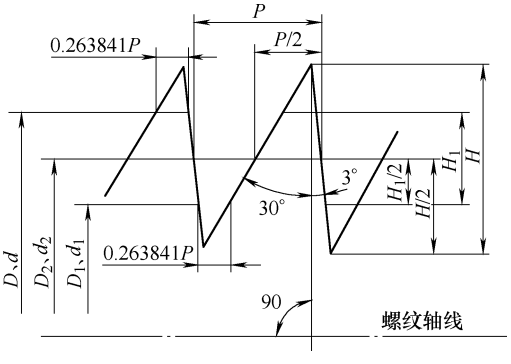
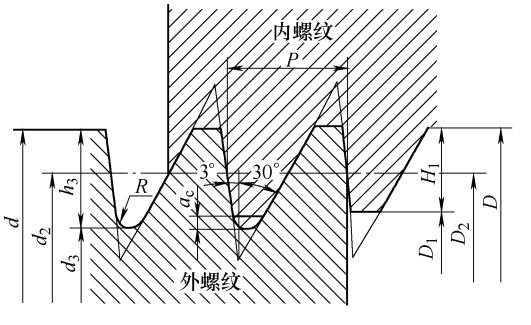


图 H-6　锯齿形螺纹基本牙型

D—内螺纹大径　d—外螺纹大径　D_1—内螺纹小径　d_1—外螺纹小径　D_2—内螺纹中径　d_2—外螺纹中径　H—原始三角形高度　P—螺距　H_1—基本牙型高度

2）设计牙型。设计牙型即设计制造牙型，其小径和非承载牙侧间都留有间隙。设计牙型及公称尺寸代号，如图 H-7 所示。



名称	代号及关系式	名称	代号及关系式
外螺纹大径	d	外螺纹中径	$d_2 = d - H_1 = d - 0.75P$
内螺纹大径	$D = d$	内螺纹中径	$D_2 = d_2$
螺距	P	外螺纹小径	$d_3 = d - 2h_3 = d - 1.735534P$
牙顶与牙底的间隙	$a_c = 0.117767P$	内螺纹小径	$D_1 = d - 2H_1 = d - 1.5P$
基本牙型高度	$H_1 = 0.75P$	牙底圆弧半径	$R = 0.124271P$
外螺纹牙高	$h_3 = H_1 + a_c = 0.867767P$		

图 H-7　锯齿形螺纹设计牙型

2. 锯齿形螺纹特点和应用

锯齿形螺纹工作面的牙侧角为3°，非工作面的牙侧角为30°，兼有矩形螺纹效率高和梯形螺纹牙根强度高的优点，但只能承受单向载荷，适用于单向承载的螺旋传动。螺纹牙强度高，用于单向受力的传力螺旋；如螺旋压力机、千斤顶等。

3. 锯齿形螺纹的表示（GB/T 13576.4—2008）

标准规定了标准的锯齿形螺纹用“B”表示。单线螺纹的尺寸规格用“公称直径×螺距”表示；多线螺纹的尺寸规格用“公称直径×导程（*P* 螺距）”表示，单位均为 mm。左旋螺纹需在尺寸规格之后加注“LH”，右旋则不注出。例如 B36×6，B44×8LH 等。

四、55°管螺纹

1. 55°密封管螺纹

55°密封管螺纹有两种配合方式，“柱/锥”（GB/T 7306.1—2000）和“锥/锥”（GB/T 7306.2—2000）。两种连接方式都具有密封性能，必要时，允许在螺纹副内加入密封填料。

1）牙型。圆锥螺纹的设计牙型，如图 H-8 所示。圆柱内螺纹的设计牙型，如图 H-9所示。

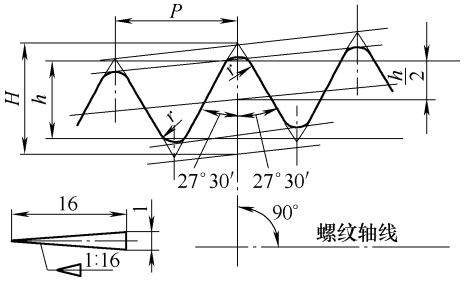


图 H-8　圆锥螺纹的设计牙型

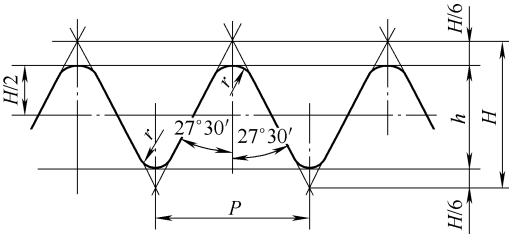


图 H-9　圆柱内螺纹的设计牙型

2）螺纹代号及标记示例。

代号：R_C—圆锥内螺纹；R_1—与 R_P 配合使用的圆锥外螺纹；

R_P—圆柱内螺纹；R_2—与 R_C 配合使用的圆锥外螺纹。

左旋螺纹的旋向代号为“LH”，右旋螺纹的旋向代号省略不标。表示螺纹副时，内、外螺纹的标记用斜线分开，左边表示内螺纹，右边表示外螺纹。

标记：圆锥内螺纹：$R_C3/4$；圆锥外螺纹（与 R_P 配合）：$R_13/4$；

圆柱内螺纹：$R_P3/4$；圆锥外螺纹（与 R_C 配合）：$R_23/4$；

左旋圆锥内螺纹：$R_C3/4LH$；

圆锥内螺纹与圆锥外螺纹配合：$R_C3/4/R_23/4$；

圆柱内螺纹与圆锥外螺纹配合：$R_P3/4/R_13/4$；

左旋圆锥内螺纹与圆锥外螺纹配合：$R_C3/4/R_23/4LH$。

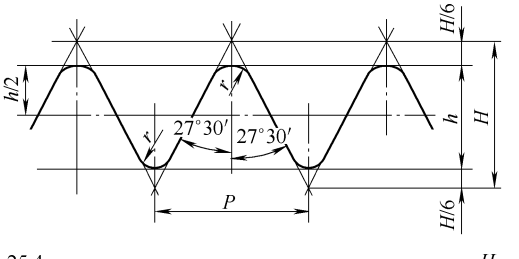
3）常用55°圆锥管螺纹钻底孔直径尺寸，见表H-14。

表H-14　常用55°圆锥管螺纹钻底孔直径尺寸　（单位：mm）

公称直径 d/in	每寸牙数 n	螺距 t	钻孔直径 ϕ	有效螺纹长度
1/8	28	0.907	8.4	6.5
1/4	19	1.337	11.2	9.7
3/8			14.7	10.1
1/2	14	1.814	18.3	13.2
3/4			23.75	14.5
1	11	2.309	29.7	16.8
1¼			38.5	19.1
1½			44.5	19.1
2			55.8	23.4
2½			71	26.7
3			85.5	29.8
4			110.5	35.8
5			136	40.1
6			161.5	40.1

2. 非密封管螺纹

1）非密封管螺纹标准（GB/T 7307—2001）规定管螺纹的内、外螺纹均为圆柱螺纹，不具备密封性能（只用作机械连接用），若要求连接后具有密封性能，可在螺纹副外采取其他密封方式。其基本牙型如图H-10所示。



$P=\frac{25.4}{n}$；$H=0.680491P$；$h=0.640327P$；$r=0.137329P$；$\frac{H}{6}=0.160082P$

图H-10　圆柱管螺纹的基本牙型

2）螺纹代号及标记示例。

螺纹特征代号用字母“G”表示。当螺纹左旋时，在公差等级代号后加“LH”，当内、外螺纹装配在一起时，内、外螺纹的标记用斜线分开，左边表示内螺纹，右边表示外螺纹。

标记：外螺纹 A 级：G½A；　外螺纹 B 级：G½B；

内螺纹：G1½；左旋螺纹：G1½LH，G1½A- LH；

内螺纹与外螺纹配合：G1½ G1½A，G1½ G1½B。

3）常用圆柱管螺纹底孔尺寸，见表 H-15。

表 H-15　常用圆柱管螺纹底孔尺寸　（单位：mm）

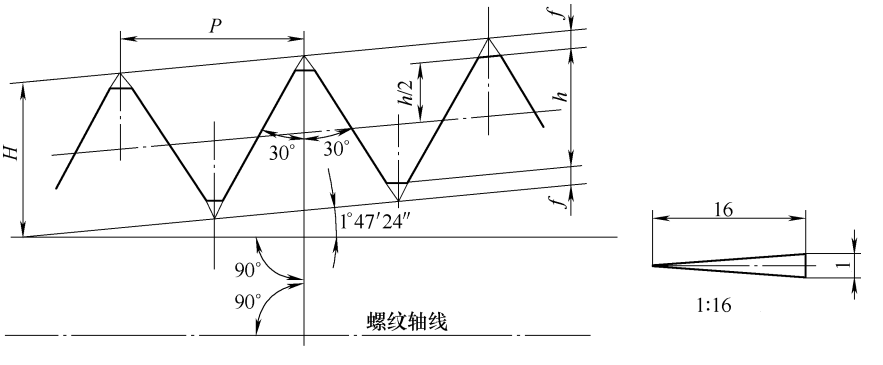
公称直径 d/in	每寸牙数 n	螺距 t	钻孔直径 ϕ	镗孔直径 ϕ	公称直径 d/in	每寸牙数 n	螺距 t	镗孔直径 ϕ
（G1/8）	28	0.907	8.8		G2	11	2.309	56.9 +0.20
G1/4	19	1.337	11.7		G2¼			63 +0.20
G3/8			15.2		G2½			72.5 +0.20
G1/2	14	1.814	18.9		G2¾			
（G5/8）			21		G3			
G3/4			24.3		G3½			
G1	11	2.309	30.5	30.5 +0.17	G4			
G1¼				39.2 +0.17	G5			
G1½				45.1 +0.17	G6			
G1¾				51.1 +0.20				

注：括号内尺寸尽可能不采用。

五、60°密封管螺纹

GB/T 12716—2011 标准规定 60°管螺纹的牙型角为 60°，锥度为 1∶16，内、外螺纹均为圆锥形，配合后的螺纹副具有密封能力，使用中允许加入密封填料。

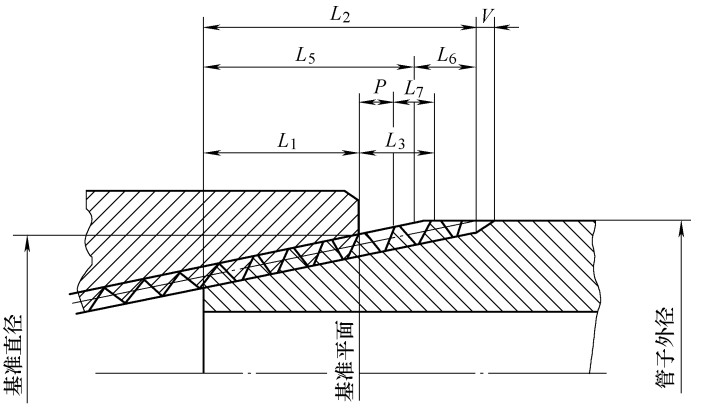
1. 螺纹基本牙型及尺寸（图 H-11）



P=25.4/n；H=0.866025P；h=0.800P；f=0.033P

a)

图 H-11　螺纹基本牙型及尺寸



b)

图 H-11　螺纹基本牙型及尺寸（续）

2. 螺纹代号及标记示例

60°圆锥管螺纹的标记由符号“NPT”和螺纹尺寸代号组成，当螺纹左旋时，在尺寸代号后加“LH”。

标记：NPT 3/4- LH；

3. 常用 60°圆锥管螺纹钻底孔尺寸（表 H-16）

表 H-16　常用 60° 圆锥管螺纹钻底孔直径　　（单位：mm）

公称直径 d/in	每寸牙数 n	螺距 t	钻孔直径 ϕ
1/8	27	0.941	8.6
1/4	18	1.411	11.1
3/8			14.5
1/2	14	1.814	17.9
3/4			23.2
1	11.5	2.209	29.2
1¼			37.9
1½			43.9
2			56
2½	8	3.175	66.27

六、米制管螺纹（60°）

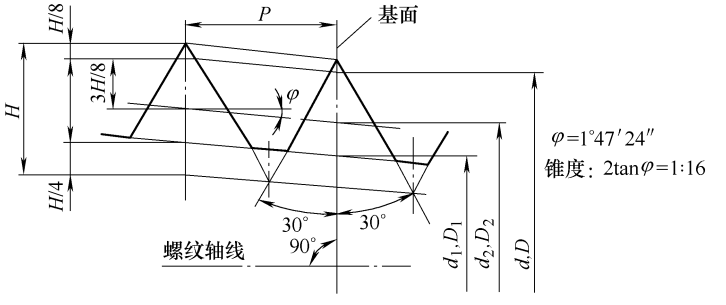
我国 1978 年颁布了米制密封螺纹标准（GB/T 1415）和普通螺纹的管路系列的标准（GB/T 1414）。2008 年和 2013 年，我国分别修订了这两项米制管螺纹标准，分别

为 GB/T 1415—2008《米制密封螺纹》和 GB/T 1414—2013《普通螺纹 管路系列》。

1. 牙型

1）一般密封米制圆柱内螺纹的基本牙型，如图 H-1 所示。

2）一般密封米制圆锥管螺纹的设计牙型，如图 H-12 所示。



$H=\frac{\sqrt{3}}{2}P=0.866025404P$；$\frac{H}{4}=0.126506351P$；$\frac{5}{8}H=0.541265877P$；$\frac{H}{8}=0.108253175P$

图 H-12　一般密封米制圆锥管螺纹牙型

2. 螺纹代号及标记示例

一般密封米制管螺纹的完整标记由螺纹特征代号、螺纹公称尺寸和基准距离代号组成。

1）一般密封米制圆锥管螺纹的特征代号为：ZM。

2）一般密封米制圆柱内螺纹的特征代号为：M。

3）基准距离代号：采用标准距离时，不标注基准距离代号；采用短形基准距离时，标注代号“S”，中间用“-”分开。

4）对一般密封米制圆柱内螺纹，要在标记后加注标准代号“GB/T 1415”，中间用“·”分开。

3. 非密封米制管螺纹（M）

非密封米制管螺纹的牙型、管路系列、公称尺寸，公差值和标记方法同米制普通螺纹。

附录 I

职称论文写作注意事项

技师、高级技师的职称评定必须通过论文答辩环节。评定标准有：论文水平、答辩水平、理论水平、技术水平和工作业绩五项。其中最重要的应该属论文，理论和技术水平主要都是在论文中反映出来的。

好的论文首先是论点正确、论据充分、素材新颖，不要重复他人做过的事，关键在于平日不断积累经验与素材。平时要多实践，只有实践得多才能见识广，多阅读好的论文，丰富技术知识，特别重要的是要善于思考和分析，总结工作中的成败。在效率与质量上要有持续改善与进步的精神，如此才能写出对实际工作有参考价值的论文。

论文还要做到结构清晰、层次分明、叙述清楚，不能车轱辘话来回说。要讲事实，切忌空讲道理。最后要讲究格式，除了文章结构规范整齐外，还要注意用词规范、图样画法及标注应符合国家标准。论文写好后，应作仔细、严格的审读。

以下几点注意事项对答辩影响很大，因此作者要特别注意。

1. 格式

尽管论文格式有很严格的要求，但是每年职称评定时提交的论文仍然存在很多的问题。在此特别强调：

1）要有页码，否则严重影响答辩提问。

2）检查错别字，不要忽略图号、书名号等问题。

3）图样可以不全，但要清晰。局部放大很必要，便于答辩相关人员的读图。

4）尽量做到图文并茂，但是要注意选材，图样和照片要有吸引力。有图有照片主要是为了使叙述简单明了，可以将一些有特色的实物带到现场，更能增加说服力。

5）不要介绍数控机床发展史或者软件、机床、刀具等常识性内容。除非是大家都不熟悉的，可以作简单的介绍。

6）最后的感谢词没有必要，尤其是带着相关人员的姓名，可能让答辩人员非常尴尬。

2. 题目

1）题目忌大。例如：选题名为《浅谈薄壁零件的加工》，但薄壁零件有很多类型，大小、形状、结构不同，而材质更有铜、铝、钢、不锈钢等很多种。论文无法面面

俱到。

2）题目要简单明了。不必加“浅谈”“试论”之类的词。

3. 选材与内容

1）按照机电行业协会的论文评价标准，优等论文的标准如下：

“论文能紧密结合本专业实际，论点正确，并有创意，论据充分，论述清晰，逻辑性强，对本专业的理论问题和发展趋势有独到见解，对实际工作有较强的指导意义。”

中等论文的标准如下：

“论文与实际工作有联系，论点无新意，或论据不全面，或尚未在实际工作中得到应用，但对实际工作有一定的参考价值，论文基本符合要求。”

从中可以看出论文内容最起码要和实际工作有联系，也就是说要有“生产过程”，这点对于一些老师、已经转行做管理的人员很困难。常见到一些介绍性质的论文，例如介绍编程软件的，如果研究成果和此软件没有直接关系，那么无论这个软件多么新、多么高级都不宜在此介绍。论文可以涉及新软件、新技术、新工艺、新刀具的应用，但是绝对不能写成说明书。这中间的区别就在于要写出应用过程中的体会，前提是应有亲身实践。

2）立意和钻研的思路要正确。比如曾经有文章介绍不用刀具半径补偿，而是改换不同半径的刀具来完成轮廓铣削；还有一篇论文设想给所有的刃具都加一个套以保证刃长相等，最后达到减少长度补偿工作量的目的。这些都不切合实际。数控加工发展至今，在传统的工艺方面已经达到了很高的水平，没有很高的技术水平就很难有所突破。

3）忌抄袭。尤其抄袭已经通过答辩的人的论文，对于比较好的论文，专家都有极深的印象，马上会被识破。

4）论文应与数控有关。一篇论文不可能面面俱到，但是数控机床操作行业的职称论文一定要与数控相关。例如只选加工工艺中的夹具设计部分，那么仅看夹具分不出是在加工中心还是普通铣床上使用，这样就无法衡量作者操作机床的水平，答辩时反而会被问及许多数控机床、数控系统、编程以及操作方面的知识。

5）要符合所报职称的标准。在技师的论文中引用的宏程序不能仅是简单的倒圆角程序；很多车工的论文都是将车、铣两道工序合并在车铣复合机床上完成，其实并没有达到工艺创新的标准。

6）要符合“对实际工作有一定的参考价值”，就要做到“归纳总结、分析提高”。这一点是绝大多数论文作者的不足之处。

参 考 文 献

[1] 陈磊，吴暐，缪燕平. 机械制造工艺［M］. 北京：北京理工大学出版社，2010.

[2] 袁夫彩. 机械制造工艺学［M］. 北京：科学出版社，2008.

[3] 陈爱荣，王守，李新德. 机械制造技术［M］. 北京：北京理工大学出版社，2010.

[4] 赵长发. 机械制造工艺学［M］. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2008.

[5] 姜佩东. 液压与气动技术［M］. 北京：高等教育出版社，2000.

[6] 劳动和社会保障部，中国就业培训技术指导中心. 机械加工通用基础知识［M］. 北京：中国劳动社会保障出版社，2010.

[7] 刘书华. 数控机床与编程［M］. 北京：机械工业出版社，2001.

[8] 李善术. 数控机床及其应用［M］. 北京：机械工业出版社，2001.

[9] 刘瑞已. 现代数控机床［M］. 西安：西安电子科技大学出版社，2011.

[10] 王海勇，成方杰. 数控机床结构与维修［M］. 北京：化学工业出版社，2009.

[11] 徐宏海. 数控机床刀具及其应用［M］. 北京：化学工业出版社，2005.

[12] 杨叔子. 机械加工工艺师手册［M］. 2 版. 北京：机械工业出版社，2011.

[13] 机械设计编委会. 机械设计手册［M］. 3 版. 北京：机械工业出版社，2004.

[14] 蒋知民，张洪鏸. 怎样识读《机械制图》新标准［M］. 北京：机械工业出版社，2005.

[15] 黄继昌. 机械工人必备手册［M］. 北京：机械工业出版社，2010.

[16] 彼得·斯密德. 数控编程手册［M］. 罗学科，刘瑛，黄根隆，等译. 北京：化学工业出版社，2005.

技术工人岗位必备 规范化您的岗位操作

员工岗位手册系列

车工岗位手册
铣工岗位手册
钳工岗位手册
磨工岗位手册
数控铣床操作工岗位手册
数控车床操作工岗位手册
加工中心操作工岗位手册
机械加工产品检验工岗位手册
金属热处理工岗位手册
铸造工岗位手册
维修电工岗位手册
制图员岗位手册
电机检测及修理工岗位手册
高低压电器装配(配线)工岗位手册
电机装配工岗位手册
天车工岗位手册
起重装卸机械操作工岗位手册
叉车工岗位手册
中央空调工岗位手册
无损检测员岗位手册

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

机械工业出版社微信服务号

快关注我吧，
我是机工社机械科技出版

上架指导 工业技术／机械工程／机械加工／数控加工

ISBN 978-7-111-47864-5

策划编辑◎何月秋 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-47864-5
9 787111 478645 >

定价：69.00元